



วิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟผงสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจาก
วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร

**TREATMENT OF WASTEWATER FROM INSTANT COFFEE
PROCESSING BY ADSORPTION USING AGRICULTURAL
WASTE PRODUCTS**

นางสาววีริยา วิริยะเขษม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จาก
การเกษตร

Treatment of Wastewater from Instant Coffee Processing by Adsorption Using
Agricultural Waste Products

นามผู้วิจัย นางสาววิริยา วิริยะเขมม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนกุล วงศ์ธนาสุนทร, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล จานุดตมวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๒ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๐

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร

Treatment of Wastewater from Instant Coffee Processing by Adsorption Using Agricultural
Waste Products

โดย

นางสาววิริยา วิริยะเขม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

วีรียา วีริยะเขม 2550: การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตยญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D. 136 หน้า

เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สูง จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง ในงานวิจัยนี้ใช้สารดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด แ้วแกลบดำ เปลือกไข่ไก่ หินภูเขาไฟ ถ่าน เยื่อกระดาษและกานมะพร้าวเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปดังกล่าว โดยการทดลองแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่หนึ่งทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของสารดูดซับ เพื่อคัดเลือกสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพ 2 ชนิดมาทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และขั้นตอนสุดท้ายศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของสารดูดซับแต่ละชนิดโดยใช้หอดูดซับทดลอง รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับดังกล่าวกับถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาพบว่าเปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้มากที่สุดและรองลงมาตามลำดับ เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุทั้งสองพบว่าพฤติกรรมดูดซับใกล้เคียงกับการดูดซับแบบฟรุนดลิช เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับที่ไอซีของสารดูดซับแต่ละชนิด พบว่าค่าคงที่สัมพันธ์กับการดูดซับ (k) และค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ($1/n$) ของเปลือกไข่ไก่ เยื่อกระดาษและถ่านกัมมันต์ มีค่า k และ $1/n$ เท่ากับ 1.649 และ 0.1707, 0.2791 และ 0.5260, และ 0.6387 และ 0.4826 ตามลำดับ จากสมการการดูดซับของ Bohart-Adams พบว่าที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.11, 0.22 และ 0.33 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นที่จุดเบรกกท 90% มีค่า N_0 (kg/m^3), K [$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{hr})$], D_0 (m) เท่ากับ 1.8653, 0.6550, 0.114 ; 1.5813, 2.2923, 0.133 ; 0.7922, 4.5859, 0.200 ตามลำดับ และที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.22, 0.43 และ 0.65 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของชั้นเปลือกไข่ไก่ที่ความเข้มข้นที่จุดเบรกกทเท่ากับ 70% มีค่า N_0 (kg/m^3), K [$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{hr})$], D_0 (m) เท่ากับ 2.9862, 2.0863, 0.029 ; 6.1146, 0.6954, 0.086 ; 3.9601, 1.0430, 0.133 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรและเวลาที่เบรกกทได้แสดงไว้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับออกแบบระบบจริง

วีรียา วีริยะเขม

ลายมือชื่อนิติ

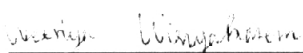
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

16 / 04 / 2550

Weeriya Wiriyakasem 2007: Treatment of Wastewater from Instant Coffee Processing by Adsorption Using Agricultural Waste Products. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 136 pages.

Because wastewater from instant coffee processing contains a large amount of organic matters, treatment of such wastewater prior to discharge is necessary. This research studied the efficiencies of various agricultural waste products e.g. bagasse, corncob, rice husk, eggshell, pumice, charcoal, paper pulp and coir pith on organic matter removals from instant coffee processing wastewater by adsorption. The experiment was divided into three stages. The first stage was to determine the removal efficiency of color by the selected agricultural waste products in batch experiments. Two best adsorbents among the selected agricultural waste products were chosen. In the second stage, adsorption isotherms of the selected materials were studied in batch experiments. Finally, kinetics coefficients were examined in adsorption columns. The results of all stages were compared to those of activated carbon.

The results indicated that eggshells and paper pulps were the two best adsorbents in color removal. In general, the adsorption behaviors could be described by Freundlich adsorption isotherm. By comparing the reduction of TOC in wastewater, the values of Freundlich constants, which were adsorption capacity (k) and adsorption intensity ($1/n$), for eggshell, paper pulp, and activated carbon were 1.1649 and 0.1707; 0.2791 and 0.5260; and 0.6387 and 0.4826 respectively. Kinetic coefficient analyses from the column experiments using Bohart-Adams equation found that N_0 (kg/m^3), K ($\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{hr}$) and D_0 (m) of activated carbon (90% breakthrough) at volumetric loading of 0.11, 0.22 and $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ were 1.6776, 0.6550, 0.114 ; 1.4375, 2.2923, 0.133 ; 0.7200, 4.5859, 0.200 respectively, and of eggshell (70% breakthrough) at volumetric loading of 0.22, 0.43 and $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ were 1.4220, 2.0863, 0.029 ; 2.8440, 0.6954, 0.086 ; 1.8278, 1.0430, 0.087 respectively. The relationships between volumetric loading and breakthrough could be used for design of full-scale adsorption system.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

Oct / 20 / 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล วงศ์ธนาสุนทรและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อเป็นการสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณคุณภาณุภูมิ โชคทวีพาณิชย์ และเพื่อนๆ ป.โทภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเจริญเลิศ และคุณแม่จิราพร วิริยะเขมม และทุกๆ คนในครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะต่างๆ ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมา

วีรียา วิริยะเขมม

ตุลาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	75
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก ค่าที่ไอซีของถ่านกัมมันต์, เปลือกไข่ไก่และเชื้อกระดาษ ที่ปริมาณและเวลาต่างๆ กัน	82
ภาคผนวก ข ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ	89
ภาคผนวก ค ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรต่างๆ	92
ภาคผนวก ง ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรต่างๆ	99
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้พิจารณาในกระบวนการบำบัด	8
2	คุณสมบัติของเปลือกไข่ไก่	28
3	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	29
4	พารามิเตอร์และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย	33
5	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	34
6	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ	36
7	สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช	39
8	ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดลิช และความจุของการดูดติดผิว	40
9	สัดส่วนระหว่าง COD: TOC ของตัวอย่างน้ำเสีย	41
10	ค่า Slope, Intercept และสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการการกำจัด ทีโอซีของถ่านกัมมันต์	69
11	ค่า Slope, Intercept และสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการการกำจัด ทีโอซีของเปลือกไข่ไก่	70
ตารางผนวกที่		
ก1	ค่าทีโอซีของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณและเวลาต่างๆ กัน	83
ก2	ค่าทีโอซีของเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณและเวลาต่างๆ กัน	85
ก3	ค่าทีโอซีของเยื่อกระดาษที่ปริมาณและเวลาต่างๆ กัน	87
ข1	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับครั้งที่ 1	90
ข2	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับครั้งที่ 2	91
ง1	ที่อัตราน้ำล้นผิวเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1	100
ง2	ที่อัตราน้ำล้นผิวเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2	102
ง3	ที่อัตราน้ำล้นผิวเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1	104
ง4	ที่อัตราน้ำล้นผิวเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2	106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ง5	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1	108
ง6	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2	110
ง7	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1	112
ง8	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2	114
ง9	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1	116
ง10	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2	118
ง11	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1	120
ง12	ที่อัตราการนำลิ้นผิวเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2	122
ง13	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์	124
ง14	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์	126
ง15	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์	128
ง16	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่	130
ง17	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่	132
ง18	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราการนำลิ้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่	134

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์	10
2	ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท	11
3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช	13
4	การเคลื่อนตัวของ adsorption zone สำหรับชั้นสารดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย	14
5	การหมดสภาพของถังดูดซับ	17
6	กราฟหาความสูงของชั้นสารดูดซับ	17
7	การผลิตกาแฟผงสำเร็จรูป	22
8	ผลิตภัณฑ์ของ phenylpropanoids, stilbene, lignans, lignins, suberins, cutins, flavonoids and tannins from phenylalanine	23
9	ลักษณะของหอดูดซับทดลอง	32
10	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสารดูดซับแต่ละชนิด	35
11	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์	37
12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของเปลือกไข่ไก่	37
13	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของเยื่อกระดาษ	37
14	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์	38
15	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของเปลือกไข่ไก่	38
16	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของเยื่อกระดาษ	38
17	ผลเปรียบเทียบไอเทอมการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด	40
18	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$.	44
19	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$	44
20	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแฉ่งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$	45

สารบัญญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	59
35	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	59
36	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	60
37	ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	60
38	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	62
39	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	63
40	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	63
41	ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	64
42	โครงสร้างของพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่	66
43	ความสัมพันธ์ระหว่าง PV และอัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ความสูงของชั้นสารดูดซับ 90 ซม.	67
44	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์	69
45	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	93
ค2 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	94
ค3 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	95
ค4 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	96
ค5 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	97
ค6 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

k	=	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ
n	=	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของสารดูดซับ
C	=	ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ
C_0	=	ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ
D_0	=	ความลึกของชั้นสารดูดซับที่จะทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ ลดลงเหลืออยู่ในค่าที่เบรคท루
t	=	ระยะเวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลอง จนกระทั่งน้ำที่เข้าสู่ระบบเข้าสู่ เบรคท루
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
Abs	=	ค่าการดูดกลืนแสง
m^2	=	ตารางเมตร
nm	=	นาโนเมตร
$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$	=	ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง
cm	=	เซนติเมตร

การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จาก การเกษตร

Treatment of Wastewater from Instant Coffee Processing by Adsorption Using Agricultural Waste Products

คำนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่ทำรายได้ให้กับเกษตรกรค่อนข้างสูง ซึ่งในอดีตรัฐบาลเคยให้การสนับสนุนการปลูกกาแฟ ทำให้ในปัจจุบันไทยสามารถผลิตเมล็ดกาแฟดิบได้เป็นจำนวนมากและสามารถส่งออกไปขายยังต่างประเทศได้มากเช่นกัน รวมทั้งขายเป็นวัตถุดิบในการผลิตกาแฟสำเร็จรูปให้แก่ผู้ผลิตในประเทศอีกด้วย (สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2545) เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบฟีนอลิกที่เคลือบอยู่บนเมล็ดกาแฟเรียกว่าสารฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เคลือบอยู่ ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกสารอินทรีย์ (organic matter) โครงสร้างโดยทั่วไปคือ วงอะโรมาติก (aromatic ring) ของ di- หรือ tri-hydroxyl-phenol เชื่อมโดย -O-, -CH₂-, -NH-, -N=, -S-, C=O และกลุ่มอื่นที่มีหมู่ไฮดรอกซิลิก (-OH groups) (Naczka and Shahidi, 2004) ปัญหาที่สำคัญของการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตคือ สีจากเปลือกเมล็ดกาแฟ ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงจึงต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Devi *et al.*, 2007)

ได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้เพื่อดูดซับสารประกอบอินทรีย์ออกจากน้ำทิ้ง (Furuya *et al.*, 1997) แต่เนื่องจากราคาค่าต้นทุนการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่สูง (Annadurai *et al.*, 2002) จึงมีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ วัสดุดังกล่าวได้แก่ เปลือกไม้ เปลือกถั่วลิสง กะลามะพร้าว ถ่านหิน ขี้เลื่อย ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย เป็นต้น (Faust and Aly, 1987) ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้ เพราะวัสดุดังกล่าวมีองค์ประกอบของเซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งภายในโครงสร้างเหล่านี้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก ที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำทิ้งได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ได้แก่ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เถ้าเกลบดำ เปลือกไข่ไก่ หินภูเขาไฟ ถ่าน เยื่อกระดาษและกากมะพร้าว ซึ่ง Akbal (2005), Calace *et al.* (2003), Mckay *et al.* (1987, 1988), Santhy *et al.* (2005), Tsai *et al.* (2007), Tseng *et al.* (2006) และจรรยา (2546) ได้ทำการศึกษาโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดด้วย และยังเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทอื่นได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูป โดยใช้สารดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและถ่านกัมมันต์
2. เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี (total organic carbon, TOC)
3. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ โดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของทีโอซี

ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำที่ใช้ในการศึกษา เป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านจากกระบวนการผลิตทั้งหมดของโรงงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดมาก่อน ตัวอย่างน้ำเสียที่ได้รวบรวมมาทำการศึกษาวิจัยทั้งหมดทำการเก็บในช่วงเดือนตุลาคม 2549 - พฤษภาคม 2550
2. หาประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาหาประสิทธิภาพในการลดค่าการดูดกลืนแสงหรือค่าแอมซอร์บแนนซ์ (absorbance) ที่คลื่นแสงจำเพาะของน้ำเสีย
3. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด ได้แก่ พีเอช สีในรูปของการดูดกลืนแสง ทีโอซี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย

การตรวจเอกสาร

การดูดซับ

การดูดซับของก๊าซได้เริ่มต้นค้นคว้าโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ต่อมาในปี ค.ศ. 1785 ได้มีการค้นคว้าการดูดซับของสารละลายของ Lowitz ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ทราบว่า การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งการดูดซับโดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำดื่มและน้ำเสีย กระบวนการดูดซับโดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนมักใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นที่สาม (tertiary treatment) หลังจากที่ได้มีการบำบัดน้ำเสียในขั้นที่สอง (secondary treatment) ตามกระบวนการต่างๆ มาแล้ว ทั้งนี้เพื่อมุ่งหวังในการบำบัดสี กลิ่น หรือสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำนั้น เป็นต้น (Metcalf , 1991)

การดูดซับเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวและพื้นที่ผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาจับติดบนพื้นผิวสัมผัสเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) และส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์จะเกิดจากแรงดึงดูด (attractive force) ระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งแรงดึงดูดทั้งหมดจะเกิดจากปฏิกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) โดยกลไกการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าใกล้สารดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดเอาชนะพลังงานจลน์ของสารที่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับจึงเกิดขึ้น การดูดซับแบ่งเป็น 2 แบบที่สำคัญ (Myer, 1999) คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงวันเดอวาล์ว (van der waals force) ซึ่งเป็นผลจากการรวมกันของแรงที่เกิดจากการแพร่ (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบดูดติดหลายชั้น (multi – layers) ซึ่งในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับทางกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและให้พลังงานต่ำ ซึ่งการดูดซับแบบนี้เป็นสมมติฐานของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของสารถูกดูดซับทำให้เกิดเป็นสารประกอบทางเคมี การดูดซับประเภทนี้จะมีความหนาของชั้นสารดูดซับเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดที่อุณหภูมิสูง เพราะปฏิกิริยาเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการดูดซับแบบนี้เป็นสมมติฐานของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ (เกรียงศักดิ์, 2539)

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer)

อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ใช้ความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะจำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล โดยแบ่งกลไกที่สำคัญในการดูดซับเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (Eckenfelder, 1981)

1. การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายเข้าถึงพื้นผิวของสารดูดซับ โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (internal diffusion) กระบวนการแพร่ภายในเป็นกลไกซึ่งตัวถูกละลายจากภายนอกโพรงของสารดูดซับแทรกตัวเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงเพื่อให้เกิดการดูดซับ โดยขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดและเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วในการดูดซับ คือ ขนาดของสารดูดซับ อัตราการไหลของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งในกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน (activated carbon)

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนแตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือถ่านกราไฟท์ตรงที่แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนจะมีความพรุน (porosity) มากกว่าถ่านชนิดอื่นๆ ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง elementary – crystallites ในถ่านเพิ่มสูงขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะทำให้ได้รูพรุนเป็นจำนวนมาก ถ่านจึงมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มมากขึ้น และสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนสามารถแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท (มอก.900-2532) คือประเภทผง (powder) และประเภทเม็ด (granular) หรือเกล็ด (pellet) สำหรับประเภทเป็นเม็ดหรือเกล็ดนี้อาจเตรียมได้จากถ่านคาร์บอนที่ทำจากวัตถุดิบต่างๆ เช่น ถ่านกะลามะพร้าว ถ่านไม้ ถ่านโค้ก ฯลฯ มาบดให้เป็นเม็ดเล็กๆ หรืออาจได้จากการเอาแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนชนิดผงมาอัดด้วยเครื่องอัดเป็นเม็ด

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทผง นิยมใช้สำหรับการฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและสีของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง ช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในกระบวนการชุบโลหะ ใช้ในการกำจัดกลิ่นของน้ำประปา ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนยังใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ อีก เช่น พงชูรส เครื่องดื่มประเภทไวน์และเบียร์ ขี้ผึ้ง พลาสติก และในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นต้น (Frederick, 1990)

ส่วนแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนประเภทเม็ดและเกล็ด นิยมใช้สำหรับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้อย่างบริสุทธิ์ (solvent recovery) และในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมฟิล์มโปรงใส อุตสาหกรรมการพิมพ์

อุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้เป็นวัสดุทำหน้ากักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ (Frederick, 1990)

แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนมีสมบัติโดยทั่วไปบางประการที่จำเป็นสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติสำคัญ คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ความพรุน (porosity) และโครงสร้างทางเคมี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ (Nicholas and Paul, 1993)

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยปกติแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนทั่วไปจะมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง $450 - 1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่ผลิตจากวัสดุต่างชนิดก็จะมีพื้นที่ผิวแตกต่างกันด้วย

2. ความพรุน (porosity) ความพรุนของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนโดยทั่วไปอยู่ในช่วงระหว่าง $0.5 - 1.5 \text{ ml/g}$ ซึ่งขนาดรูพรุนจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการออกซิไดส์ของวัสดุระหว่างกระบวนการกระตุ้น โดยโครงสร้างความพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1) มาโครพอร์ (macro pores) ทั่วไปมาโครพอร์ในแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่พบมีขนาดรูพรุนในช่วงระหว่าง $5,000 - 20,000 \text{ \AA}$ ความพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง $0.2 - 0.8 \text{ ml/g}$ และพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงระหว่าง $0.5 - 2 \text{ m}^2/\text{g}$

2) ทรานซิชันนอลพอร์ (transitional pores) จะมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง $20 - 200 \text{ \AA}$ โมเลกุลเดี่ยวและโพลีโมเลกุล (polymolecule) สามารถดูดซับได้ในพื้นที่ผิวบริเวณนี้ ความพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง $0.02 - 0.1 \text{ ml/g}$ และพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงระหว่าง $20 - 70 \text{ m}^2/\text{g}$

3) ไมโครพอร์ (micro pores) ขนาดรูพรุนของไมโครพอร์มีค่าน้อยกว่า $20 \text{ \AA}$ ความพรุนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $0.15 - 0.5 \text{ ml/g}$ และพื้นที่ผิวมีค่าน้อยที่สุด 95 % ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

3. โครงสร้างทางเคมี โดยโครงสร้างทางเคมีบนผิวแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนเป็นส่วนที่สำคัญในการกำหนดความสามารถในการดูดซับ สมบัติทางเคมีของพื้นผิวขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิตแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน รูปแบบและสถานะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น

ตารางที่ 1 สมบัติของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้พิจารณาในกระบวนการบำบัด

สมบัติของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้พิจารณาในกระบวนการบำบัด	
- พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)	- อัตราการบำบัด (hydraulic loading rate)
- ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)	- ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number)
- ความหนาแน่นใช้งาน (bulk density)	- โมลาสันัมเบอร์ (molasses number)
- ขนาดประสิทธิผล (effective size)	- ความชื้น (moisture)
- ความพรุน (porosity)	- เถ้า (ash)
- ปริมาตรรูพรุน (pore volume)	- ตัวเลขการกัดกร่อน (abrasion number)

ที่มา: Cheremisinoff and Ellerbusch (1987)

สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยใช้สารดูดซับ สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ และปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด โดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) (วิวรรณ, 2539; ชัยวัฒน์, 2522)

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎี และการสังเกตจากการทดลอง โดยมีรูปแบบดังนี้

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์คือ

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณดูดซับ

- 3) พื้นที่ของการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- 4) พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับ แสดงดังสมการ

$$\frac{X}{m} = \frac{aBC_e}{1 + BC_e} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

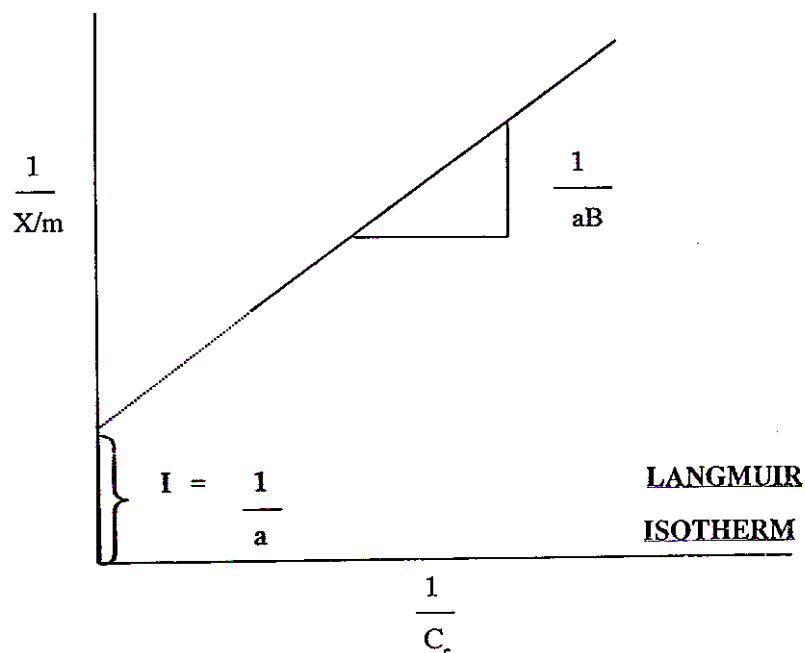
โดยที่ $\frac{X}{m}$	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ, mg/g หรือ mole/g
a	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่มากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ, mg/g หรือ mole/g
B	=	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ
C_e	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล, mg/g หรือ mole/g

เขียนให้อยู่ในสมการเส้นตรงได้เป็นดังสมการที่ 2

$$\frac{1}{X/m} = \frac{1}{a} + \frac{1}{aB} \cdot \frac{1}{C_e} \quad (\text{สมการที่ 2})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{X/m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ จะได้เส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{aB}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{a}$

ความสัมพันธ์จากสมการที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett – Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท พัฒนามาจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multi – layers) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท มีสมมติฐานพื้นฐานว่า แต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรกจะเป็นบริเวณที่ซึ่งโมเลกุลชั้นที่สองดูดซับเช่นเดียวกับชั้นต่อไป โดยแสดงดังสมการ

$$\frac{X}{m} = \frac{aAC_e}{(C_s - C_e)[1 + (A-1)(C_e/C_s)]} \quad (\text{สมการที่ 3})$$

โดยที่ $\frac{X}{m}$	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ, mg/g หรือ mole/g
a	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่มากที่สุดถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ, mg/g หรือ mole/g
A	=	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ

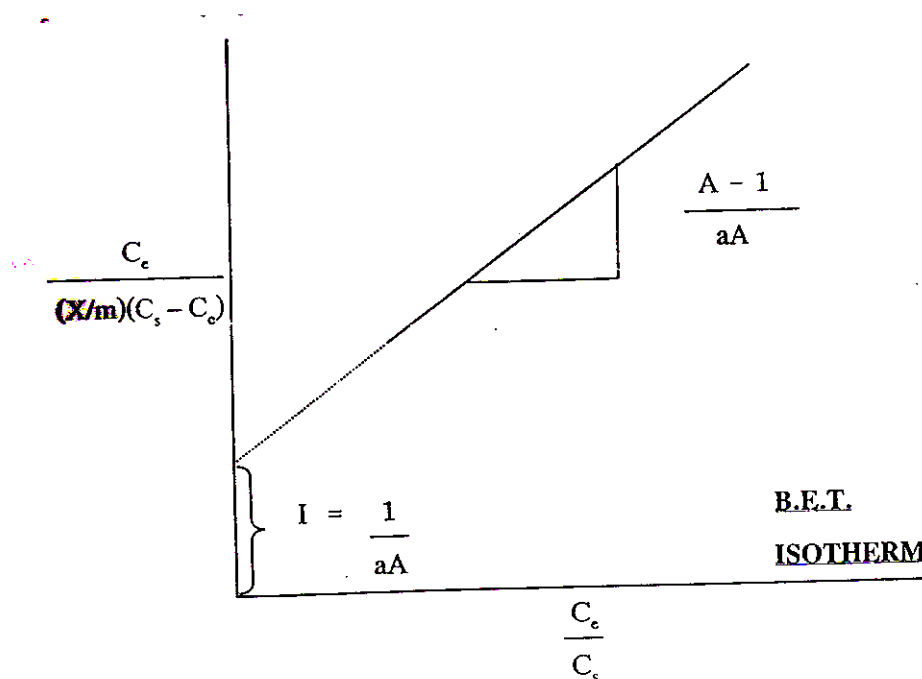
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล, mg/l
หรือ mole/l

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย, mg/l หรือ mole/l

เขียนให้อยู่ในสมการเส้นตรงได้เป็นดังสมการที่ 4

$$\frac{C_e}{(X/m)(C_s - C_e)} = \frac{1}{aA} + \frac{A-1}{aA} \cdot \frac{C_e}{C_s} \quad (\text{สมการที่ 4})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(X/m)(C_s - C_e)}$ กับ $\frac{C_e}{C_s}$ จะได้เส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ $\frac{A-1}{aA}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{aA}$ โดยความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

3. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดิชใช้อย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\frac{X}{m} = kC_e^{1/n} \quad (\text{สมการที่ 5})$$

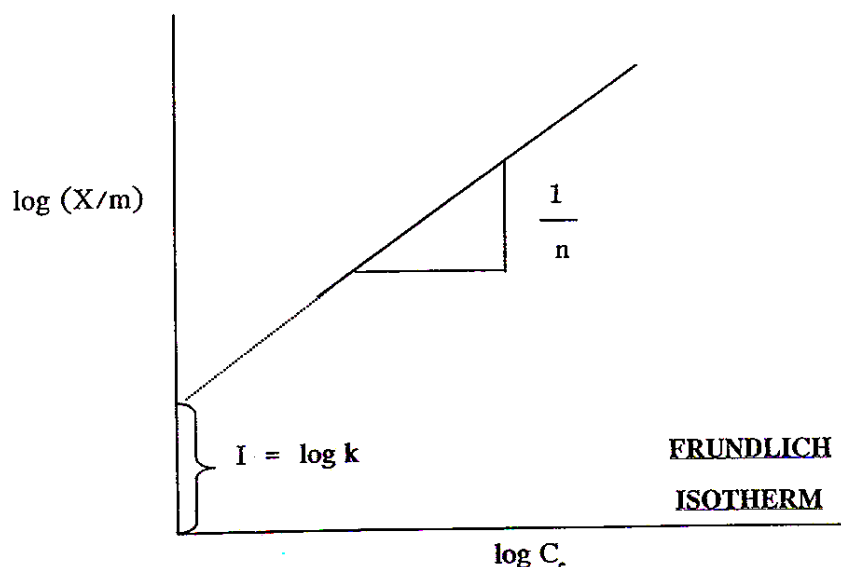
โดยที่	$\frac{X}{m}$	= ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ, mg/g หรือ mole/g
	C_e	= ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล, mg/g หรือ mole/l
	k	= ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ
	n	= ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

เขียนในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$\log \left[\frac{X}{m} \right] = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{สมการที่ 6})$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log \left[\frac{X}{m} \right]$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$

และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log k$ โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ 6 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 Mihelcic (1999) อธิบายว่า สมการฟรุนดิชไอโซเทอมแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า $n < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (unfavourable adsorption) ถ้า $n = 1$ แสดงถึงการดูดซับที่เป็นสมการเส้นตรง และถ้า $n > 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ดี (favourable adsorption)

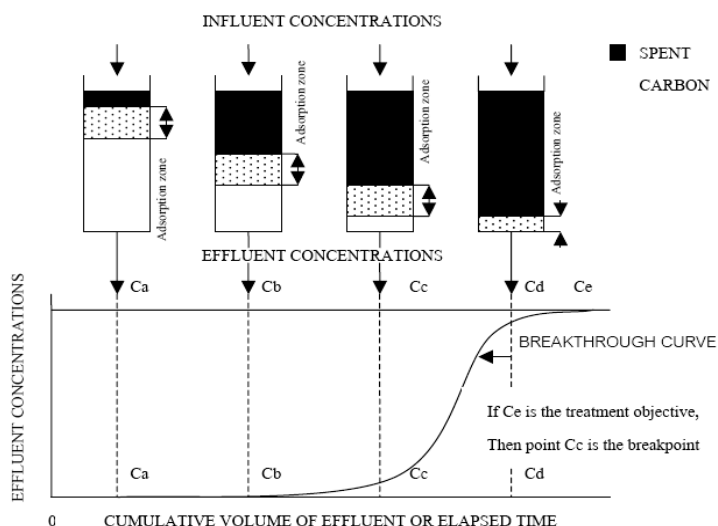


ภาพที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ จะสามารถพิจารณาเลือกชนิดถ่านที่มีความเหมาะสม อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอต่อการออกแบบกระบวนการดูดซับ จะต้องมีการทดลองในแบบต่อเนื่องในหอดูดซับทดลอง เพื่อหาอายุการใช้งานของสารดูดซับที่มีความเป็นไปได้ในการดูดซับก่อนจะหมดประสิทธิภาพ

เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นสารดูดซับ สารดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพ และชั้นของสารดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาใช้งานดังภาพที่ 4 ดังนั้นความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนในที่สุดความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ ที่จุดนี้เรียกว่า จุดเบรกทรู (breakthrough point) โดยเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับ จนถึงจุดเบรกทรู เรียกว่า เวลาการใช้งาน (service time) และเมื่อสารดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่สารดูดซับหมดประสิทธิภาพ (exhaust point) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบ



ภาพที่ 4 การเคลื่อนตัวของ adsorption zone สำหรับชั้นสารดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย

ที่มา: Clark and Lykins (1989)

โดยที่เวลาการใช้งานของสารดูดซับจะขึ้นอยู่กับ

- 1) ความลึกของชั้นสารดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของสารดูดซับจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มความลึกของชั้นสารดูดซับ และจะลดลงเมื่อความลึกของชั้นสารดูดซับลดลง
- 2) พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเวลาใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย
- 3) อัตราการบำบัด จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับคือที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ
- 4) ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับ จะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ

การหาสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่อง ของ bed depth service time

เกรียงศักดิ์ (2546) กล่าวว่าเมื่อสารดูดซับที่บรรจุอยู่ในถังดูดซับมีน้ำเสียไหลจากด้านล่าง ขึ้นสู่ด้านบน พบว่าสารดูดซับจะหมดสภาพจากส่วนล่างก่อน มีช่วงเกิดสภาพดูดซับบริเวณ ส่วนกลางของถัง และมีช่วงที่ยังไม่ได้ใช้งานบริเวณส่วนบนของถัง

แต่อัตราเร็วในการหมดสภาพของชั้นสารดูดซับจะมีไม่คงที่ พบว่าในช่วงแรกคุณภาพน้ำที่ได้จากระบบจะดีอย่างต่อเนื่อง เมื่อคุณภาพน้ำทิ้งเริ่มแย่ จะมีคุณภาพน้ำทิ้งแย่ลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่มีอัตราในการหมดสภาพของสารดูดซับอย่างเร็วมาก จนไม่สามารถใช้งานได้ อีกต่อไป

ในระบบการดูดซับจะพิจารณาที่ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ/ความเข้มข้นของน้ำทิ้ง ที่ออกจากระบบ หรือ C/C_0 เท่ากับ 0.05 หรือ 0.10 แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 0.10 ซึ่งจุดนี้คือจุด แรกหัก หลังจากนั้นควรทำการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับได้แล้ว ถ้าปล่อยเดินระบบต่อไปจะมีค่า C/C_0 เพิ่มขึ้นเป็น 0.90 อย่างรวดเร็ว ถึงเวลานั้นแล้วสารดูดซับหมดสภาพ ไปแล้วทั้งถัง และส่งผลให้เกิด การคายสารออก (desorption) ลักษณะการหมดสภาพของถังดูดซับแสดงดังภาพที่ 5 และอีกไม่นาน ค่า C/C_0 จึงเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดคือ 1 ค่า C/C_0 ที่แตกต่างกันระหว่าง 0.10 กับ 0.90 จะเป็นช่วงการ ทำงานของสารดูดซับ (adsorption zone)

เมื่อทำการพลอตกราฟเส้นตรงระหว่างเวลาสัมผัสของ C/C_0 เท่ากับ 0.90 และ C/C_0 เท่ากับ 0.10 กับความลึกของชั้นสารดูดซับ จะได้ดังสมการที่ 7

$$t = ax + b \quad (\text{สมการที่ 7})$$

สำหรับค่า a แสดงได้ดังสมการที่ 8

$$a = \frac{N_0}{C_0 v} \quad (\text{สมการที่ 8})$$

- โดยที่ a = ค่าความชัน, hr/m
 N_o = ความสามารถในการดูดซับ, kg/m³
 C_o = ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ, mg/l
 v = ความเร็วในการไหลของน้ำทิ้งผ่านชั้นสารดูดซับ, m³/m².hr

สำหรับค่า b แสดงได้ดังสมการที่ 9

$$b = \frac{\ln[(C_o/C)-1]}{KC_o} \quad (\text{สมการที่ 9})$$

- โดยที่ b = ค่าจุดตัดแกน, hr
 C_B = ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ, mg/l
 K = ค่าคงที่อัตราดูดซับ, m³/kg.hr

จากภาพที่ 6 จุดตัดเส้นกราฟ $C/C_o = 10\%$ ตัดกับแกน x จะได้จุดค่าความลึกวิกฤต ซึ่งก็คือค่าความลึกของชั้นสารดูดซับอย่างน้อยที่สุดสำหรับ ณ เวลา t เท่ากับ 0

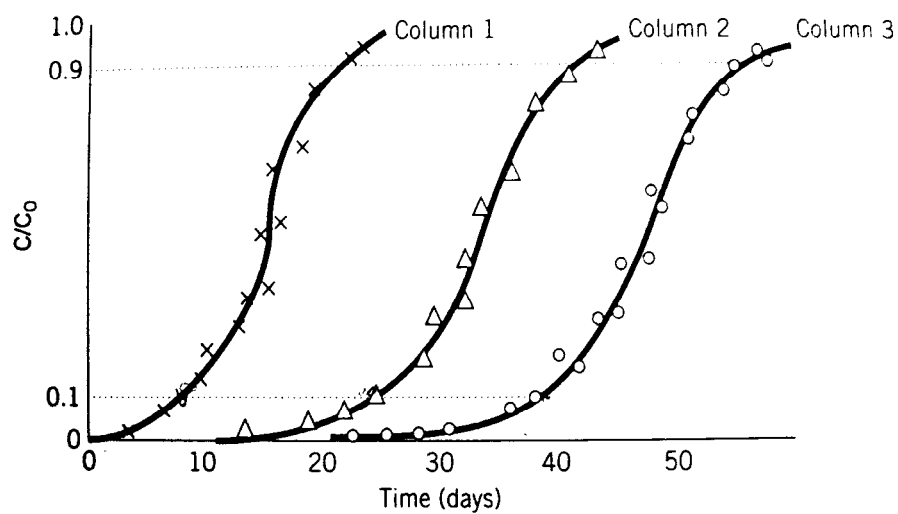
จากสมการที่ 8 ค่า a มีหน่วยเป็น hr/m ถ้านำมากลับเศษเป็นส่วนจะได้เป็น $1/a$ ซึ่งมีหน่วยเป็น m/hr ซึ่งจะเป็นค่าแสดงไว้ดังสมการที่ 10

$$v_{\text{ดูดซับ}} = \frac{1}{a} \quad (\text{สมการที่ 10})$$

- โดยที่ $v_{\text{ดูดซับ}}$ = ความเร็วของการดูดซับ, m/hr

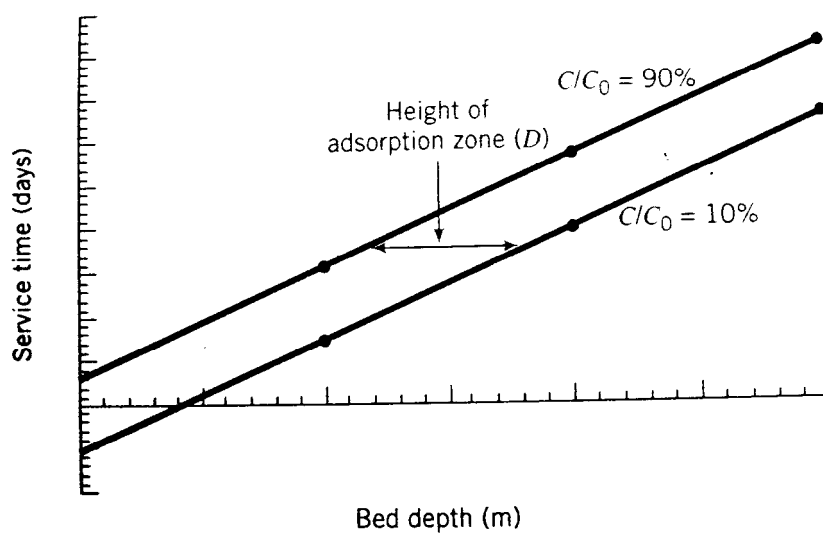
ถ้านำความสูงของชั้นสารดูดซับ (D) มาหารด้วยค่าความเร็วของการดูดซับจะได้ค่าระยะเวลาหมดสภาพดังแสดงไว้ในสมการที่ 11

$$\text{ระยะเวลาหมดสภาพ, hr} = \frac{D}{\text{ความเร็วของการดูดซับ}}$$



ภาพที่ 5 การหมดสภาพของถังดูดซับ

ที่มา: Watts (1994)



ภาพที่ 6 กราฟหาความสูงของชั้นสารดูดซับ

ที่มา: Watts (1994)

การหาสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams

สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในระดับ full-scale ซึ่งแสดงได้ดังนี้ (Eckenfelder, 1989)

$$t = \frac{N_o}{C_o v} \left[D - \frac{v}{KN_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (\text{สมการที่ 12})$$

- โดยที่
- t = break point time หรือ service time, hr
 - v = ความเร็วในการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นสารดูดซับ, $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
 - K = ค่าคงที่อัตราดูดซับ, $\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{hr}$
 - D = ความสูงของชั้นดูดซับ, m
 - N_o = ความสามารถในการดูดซับ, kg/m^3
 - C_o = ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำที่เข้าสู่ระบบ, mg/l
 - C_B = ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำที่ออกจากระบบ, mg/l

ถ้าให้ $t = 0$ แล้วแทนในสมการที่ 12 จะได้

$$D_o = \frac{v}{KN_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \quad (\text{สมการที่ 13})$$

ในกรณีนี้ D_o เรียกว่า ความลึกวิกฤต (critical bed depth) คือความสูงของชั้นสารดูดซับที่จะทำให้ค่า C_o ลดเหลือ C_B และจากสมการที่ 13 สามารถหาค่าได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง t กับ D จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชัน (a) เท่ากับ $\frac{N_o}{C_o v}$ ค่า K หาได้จาก

$$\text{y-intercept (b)} = \left(\frac{-1}{K \cdot C_o} \right) \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \quad (\text{สมการที่ 14})$$

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (factor affecting adsorption)

1. ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง (มันสิน, 2539)

2. ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลมีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่เป็นตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้นเพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง (มันสิน, 2539)

3. ความเป็นกรด – ด่าง (pH)

ถ้าค่าพีเอชลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะ H^+ เพิ่มขึ้น และ H^+ ยังสามารถดูดติดผิวคาร์บอนได้ ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (neutralized) เสมอ เนื่องจากคาร์บอนเป็นนอนโพลาาร์ที่ค่อนข้างจะลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาาร์ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี (มันสิน, 2539)

กระบวนการผลิตกาแฟกิ่งสำเร็จรูป

การผลิตกาแฟกิ่งสำเร็จรูปนั้น เป็นการสกัดและการทำแห้งของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟ และองค์ประกอบของสารให้กลิ่น ให้ผงหรือเป็นเมล็ดเล็กๆ การผลิตกาแฟกิ่งสำเร็จรูปไม่เหมาะสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนสูงในด้านเครื่องจักร เช่น เครื่องสกัด เครื่องทำแห้งแบบผง (prestripping) บางครั้งสารประกอบที่ให้กลิ่น รส จะถูกแยกออกก่อนที่จะทำการสกัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ ใช้วิธีการผ่านไอน้ำไปบนกาแฟที่ผ่านการคั่วแล้ว ความดันไอน้ำเริ่มต้นจะสูงพอที่จะทำให้ไอน้ำผ่านฐานที่รองรับกาแฟไปได้ สารที่ให้กลิ่น รส จะถูกควบแน่นด้วย Tubular condenser และจะนำไปผสมกับกาแฟที่สกัดได้ในภายหลัง ภาพที่ 7 แสดงการผลิตกาแฟกิ่งสำเร็จรูป

1. การสกัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกาแฟ การสกัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย การสกัดจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสารละลายมีความเข้มข้นประมาณ 15 – 25 % w/w การสกัดนิยมทำที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณของแข็งที่สกัดได้แห้งยาก การสกัดของแข็งที่ละลายน้ำได้มี 3 วิธีด้วยกันคือ

- *Percolation battesrs* เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไป โดยนำกาแฟที่คั่วบรรจุในภาชนะ จากนั้นจะผ่านน้ำร้อนเข้าไปสกัด ของแข็งที่ละลายน้ำในกาแฟ น้ำกาแฟจะถูกปล่อยออกไปแล้ว ภาชนะอันใหม่จะเข้ามาแทนที่ภาชนะเดิม อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดอยู่ที่ 175 องศาเซลเซียสภายใต้ความดัน สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นประมาณ 15 – 25 % w/w เข้าสู่กระบวนการทำแห้งต่อไป

- *Countercurrent system (ระบบการไหลสวนทาง)* กาแฟจะถูกผ่านเข้าสู่ภาชนะควบคุมอุณหภูมิรูปทรงกลมอย่างต่อเนื่อง และจะถูกขนขึ้นด้านบนด้วยวาล์วเกลียวที่มีรอบการหมุน 10 – 22 รอบต่อชั่วโมง น้ำร้อนจะเข้ามาทางด้านบนเพื่อสกัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกาแฟ จากนั้นน้ำกาแฟที่ได้จะปล่อยออกทางด้านล่าง การทำงานของระบบต้องใช้ความดันและอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

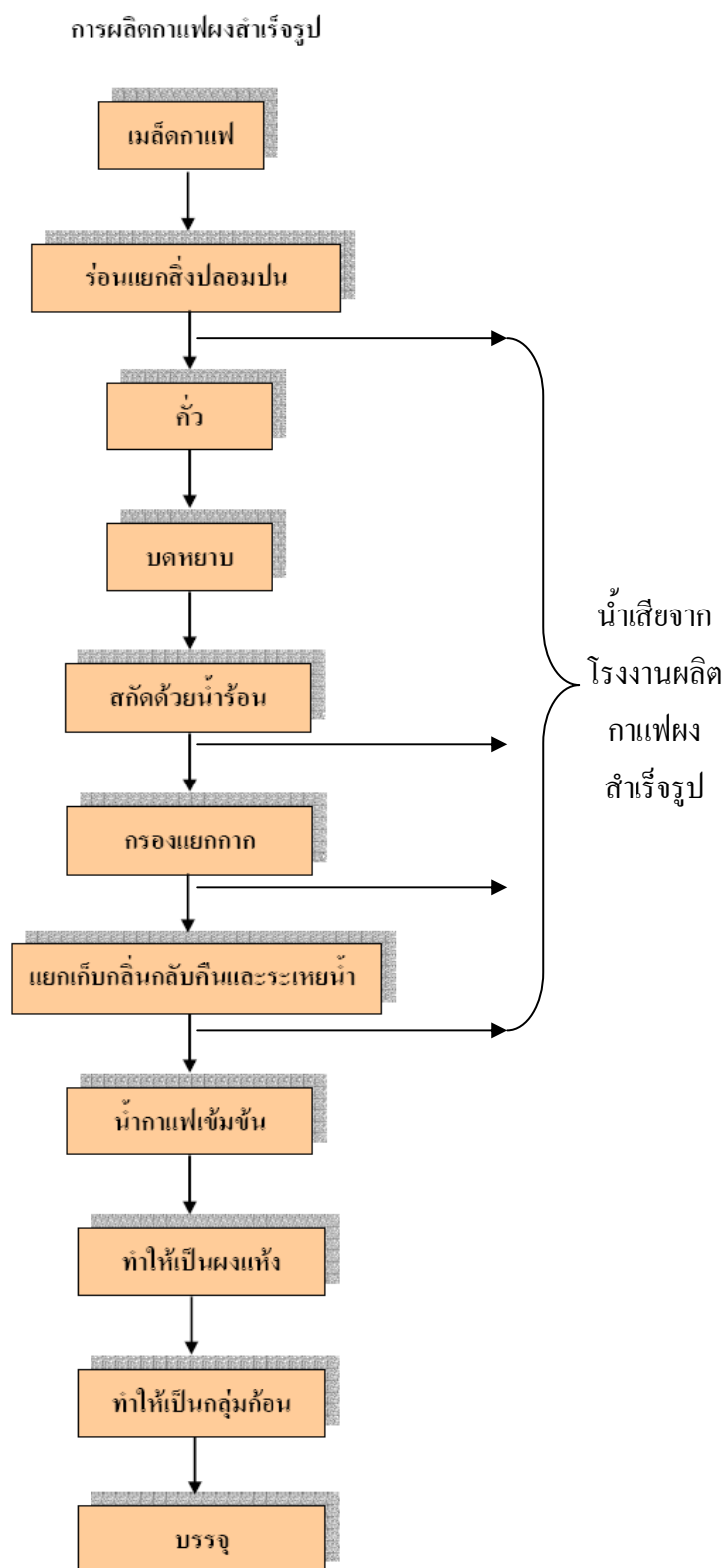
- *Slurry Extraction* กาแฟและน้ำจะถูกกวนเข้าด้วยกันในแท่งและจะแยกออกจากกันโดยการหมุนเหวี่ยง ซึ่งเครื่องจักรสำหรับกระบวนการนี้มีราคาค่อนข้างแพงมาก

2. **การทำแห้ง (drying)** น้ำกาแฟที่ได้สามารถทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง หรือเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

- **การทำแห้งแบบพ่นฝอย** เป็นการทำให้กาแฟเกิดเป็นละอองเล็กขนาดหยดน้ำ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 – 200 ไมโครเมตร) ในกระแสมรณะร้อนที่ไหลในทิศทางเดียวกัน (150 – 300 องศาเซลเซียส) ในถังทำแห้งขนาดใหญ่ กาแฟแห้งที่ได้จะถูกแยกออกไปโดยการใช้ centrifugal atomizer ส่วนของเหลวจะถูกส่งไปยังภาชนะหมุน เพื่อสร้างขนาดของหยดสารละลายใหม่ในการสเปรย์ ผลกาแฟที่แห้งแล้วจะนำออกโดยการใช้สายพานลำเลียงแบบสกรูเกลียว หรือระบบนิวเมติก

- **การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)** การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำแห้ง โดยการทำให้ของแข็งกลายเป็นไอโดยไม่ละลายหรือเรียกว่า การระเหิด โดยน้ำกาแฟจะถูกทำให้แข็งอย่างช้าๆ ในอุปกรณ์แช่แข็งทั่วไป จากนั้นจึงทำการระเหิดภายใต้ความดัน 610 PA และร้อน โดยไอที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลับไปควบแน่นในคอยล์เย็น การทำแห้งขั้นสุดท้ายจะรวมถึงการทำแห้งแบบระเหิดด้วย กาแฟจำเป็นที่จะต้องอยู่ในสภาพที่คล้ายโฟมเพื่อป้องกันการเกิดผลิตภัณฑ์กาวของวัตถุดิบที่แช่แข็ง

- **การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying)** การทำแห้งแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมนักในขณะนี้ เนื่องจากการทำแห้งจะทำให้กาแฟต้องสัมผัสกับลูกกลิ้งรูปทรงกระบอกที่ร้อนจัด

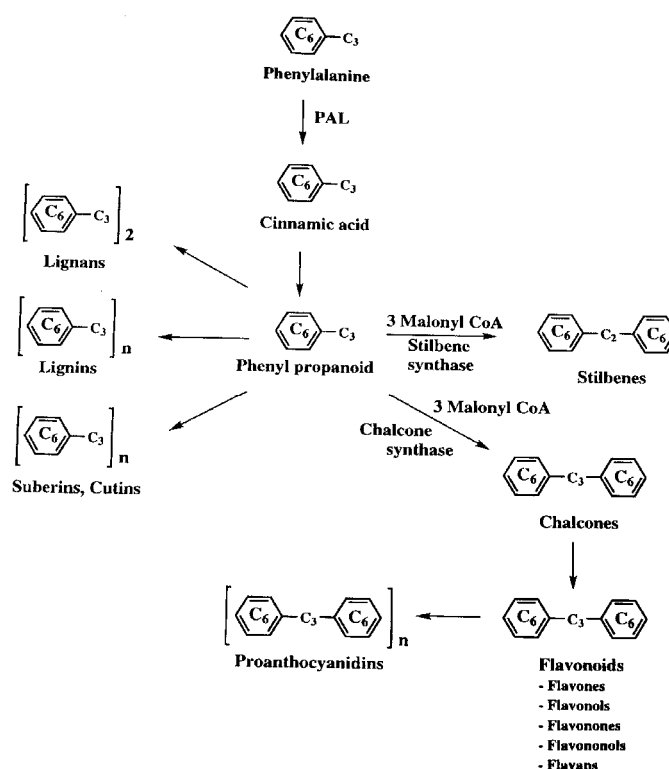


ภาพที่ 7 การผลิตกาแฟผงสำเร็จรูป

ที่มา: สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2544)

คุณลักษณะของสีจากเมล็ดกาแฟ

ฟีนอลิก (phenolics) เป็นสารประกอบที่มีอยู่ในธรรมชาติซึ่งสามารถพบได้ในพืช ฟีนอลิกประกอบไปด้วย Simple phenols, Phenolic acid (both benzoic and cinnamic acid derivatives), Coumarins, Flavonoids, Stilbenes, Hydrolyzable and condensed tannins, lignans and lignin ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ผลิตภัณฑ์ของ phenylpropanoids, stilbene, lignans, lignins, suberins, cutins, flavonoids and tannins from phenylalanine

ที่มา: Naczka and Shahidi (2004)

สารประกอบฟีนอลิกนั้นมีทั้งที่ละลายน้ำ (soluble phenolics) และไม่ละลายน้ำ (insoluble phenolics) กล่าวคือ soluble phenolics นั้นจะเป็นส่วนประกอบอยู่ใน cell vacuoles ทั้งนี้ปริมาณความเข้มข้นของสารฟีนอลิกจะมากที่ส่วนประกอบด้านนอกของเซลล์ของพืชมากกว่าด้านในเซลล์ของพืช ซึ่งสารฟีนอลิกที่อยู่ outer layer นั้นจะไม่ละลายน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะอยู่บริเวณ cell wall ของพืช โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นจำพวก lignin (the polymer of monolignol units) และ

hydroxycinnamic acid นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกนั้น เมื่ออยู่ในอาหารจะทำให้อาหารมีกลิ่น (melanodins) (Andriot, 2004) มีรสขมและมีสีน้ำตาลเข้ม

Gernjak *et al.* (2003) ได้กล่าวไว้ว่า สารฟีนอลิกในธรรมชาติ (natural phenols) นั้น สามารถพบได้ในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานเพอร์นิเจอร์ไม้ โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานผลิตกาแฟ เป็นต้น ทั้งนี้ยังสามารถพบได้ในของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร นอกจากนี้แล้วยังกล่าวอีกว่าสารประกอบฟีนอลิกนั้นมีค่าความเป็นพิษน้อย แต่สารประกอบฟีนอลิกนั้นส่งผลต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ เนื่องจากว่าจุลินทรีย์ในน้ำเสียนั้นไม่สามารถที่จะกำจัดสารดังกล่าวได้

น้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟนั้นจะมีสีน้ำตาลเข้ม เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่บนเมล็ดกาแฟเรียกว่าสารฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เคลือบอยู่ ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกสารอินทรีย์ (organic matter) โครงสร้างโดยทั่วไปคือวงอะโรมาติก (aromatic ring) ของ di- หรือ tri-hydroxyl-phenol เชื่อมโดย -O-, -CH₂-, -NH-, -N=, -S-, C=O และกลุ่มอื่นที่มี -OH groups

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จรรยา (2546) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล และสีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยขี้เถ้าแกลบดำ พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีอิทธิพลต่อการกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล และสีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยขี้เถ้าแกลบดำ ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเมื่อค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขี้เถ้าแกลบดำและเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น

สุจินต์ (2544) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอยและความขุ่นของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีพบว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราน้ำล้นผิวลง และเมื่อระยะเวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับสี ซีโอดีและความขุ่นลดลง แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้น

Akbal (2005) ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิด methylene blue และชนิด crystal violet โดยใช้หินภูเขาไฟ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีน้อยลง ระยะเวลาสัมผัสและปริมาณสารดูดซับมากขึ้น

Calace *et al.* (2003) ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้สัณฐานของเยื่อกระดาษ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น

EI – Geundi (1991) ใช้ซังข้าวโพดป่นขนาดอนุภาค 250 – 355 μm 355 – 500 μm 500 – 710 μm และ 710 – 1000 μm ซึ่งมีเซลล์โลสเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างของเซลล์โลสนี้เมื่อสัมผัสกับน้ำจะให้ประจุลบ จะสามารถดูดติดผิวกับสีย้อมเบสิกซึ่งมีประจุบวกได้ ในการทดลองพบว่าซังข้าวโพดป่นมีศักยภาพในการกำจัดสีย้อม การเพิ่มอัตราการกวนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการลดขนาดซังข้าวโพดป่นจะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกสูงกว่าสีย้อมแอสิก

Hamdaoui (2006) ทำการศึกษาการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยใช้จีเลี่ยและอิฐป่นที่มีขนาด 80 – 315 μm พบว่าเวลาที่เบรคทูล์และเวลาที่หมดสภาพของสารดูดซับจะมากขึ้นเมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับมากขึ้นและอัตราการไหลที่น้อยลง เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลน้อยลง เวลาสัมผัสระหว่างสีและสารดูดซับจะมากขึ้น จากสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชใช้อธิบายถึงการดูดซับระหว่างของแข็งและของเหลว พบว่าทั้งจีเลี่ยและอิฐป่นมีความสามารถในการดูดซับสีได้ดี

Ghorai and Pant (2004) ทำการศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำดื่มโดยใช้อะลูมินา พบว่าการดูดซับจะขึ้นกับค่าพีเอช โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่สุด และประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลงเมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นของฟลูออไรด์มากขึ้น

Low and Lee (1997) ได้ศึกษาการใช้ Quaterized Rice Husk ซึ่งเป็นเกลบที่ถูกดัดแปลงโดยสารเคมี N – (33-chloro-2-hydroxy propyl)-trimethylammonium chloride ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ พบว่าในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้นของสารอิเล็กโตรไลต์สูงๆ จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของ Quaterized Rice Husk เป็นแบบการดูดซับทางเคมี (chemisorption) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดย Quaterized rice husk กับตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์ SR – Amberlite TRC – 7L8 anion exchanger และ natural rice husk พบว่า Quaterized rice husk มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ

Mckay *et al.* (1987) ศึกษาการนำสารดูดซับราคาถูกมาใช้กำจัดสีข้อมในน้ำเสีย 6 สารคือ เปลือกไม้สั๊ก แกลบ เศษฝ้าย ถ่าน เส้นผม และเบนโทไนท์ พบว่า เบนโทไนท์เกิดพันธะที่แข็งแรงในการดูดติดสีข้อม ทำให้การชะสีออกเป็นไปได้น้อย ส่วนแกลบข้าว เปลือกไม้สั๊ก เศษฝ้าย และเส้นผม สามารถดูดซับสีข้อมเบสิคได้เท่านั้น และยังเกิดปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนประจุและพันธะเคมีในขณะที่มีการดูดติดผิวอีกด้วย

Mckay *et al.* (1988) ทำการศึกษาการดูดซับสีข้อม 4 ชนิดโดยใช้ชานอ้อย พบว่าอัตราการปั่นป่วน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม ปริมาณสารดูดซับ ขนาดของสารดูดซับ และอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการดูดซับ

Mendoza and Rivera (1998) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตกาแฟโดยใช้ระบบ UASB พบว่าเมื่อทำการเดินระบบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 77.2 % ที่ภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.89 kg.CODm³/day และเวลากักพักน้ำเท่ากับ 22 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 2.4 kg.CODm³/day ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง

Santhy *et al.* (2005) ทำการศึกษาการดูดซับสีข้อมโดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ทำจากกาบมะพร้าว พบว่าในการทดลองแบบเบตซ์ประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสและปริมาณสารดูดซับที่มากขึ้น และในการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับมากขึ้นและอัตราการไหลที่น้อยลง

Tsai *et al.* (2007) ทำการศึกษาการดูดซับสีข้อมชนิด basic blue 9 และชนิด acid orange 51 โดยใช้เปลือกไข่ไก่บดและไม่บด พบว่าเปลือกไข่ไก่บดสามารถดูดซับสีข้อมชนิด basic blue 9 ได้น้อยกว่าสีข้อมชนิด acid orange 51 แต่เปลือกไข่ไม่บดสามารถดูดซับสีข้อมชนิด acid orange 51 ได้น้อยกว่าเปลือกไข่ไก่บด

Tseng *et al.* (2006) ทำการศึกษาการดูดซับสีและฟีนอลโดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนจากชังข้าวโพดโดยใช้ KOH และกระบวนการ CO₂ gasification ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่าง KOH กับชังข้าวโพดเท่ากับ 1 และใช้กระบวนการ CO₂ gasification ที่เวลาแตกต่างกันพบว่า เมื่อระยะเวลา CO₂ gasification มากขึ้น ปริมาณพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนระหว่าง $\frac{V_{micro}}{V_{pore}}$ ลดลง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. กระจกกรองขนาด 0.45 μm
2. เครื่องแก้ว
3. เครื่องเขย่า (shaker)
4. เครื่องชั่งละเอียดแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องยูวี - วิชิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (U – 2008 Spectrophotometer, Hitachi)
6. เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (pH meter)
7. เครื่องสูบน้ำ (dosing tank)
8. เครื่อง Total organic carbon analyzer (TOC – 5000A)
9. ชุดกรองลดความดัน
10. ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 6 เมช
11. ตู้อบความร้อน
12. หอดูดซับทดลอง (adsorption column)

วิธีการ

การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของสารดูดซับ ทำการศึกษาสารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรชนิดต่างๆ ได้แก่ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เถาแกลบดำ เปลือกไข่ไก่ หินภูเขาไฟ ถ่าน เยื่อกระดาษและกากมะพร้าวเพื่อเลือกชนิดของสารดูดซับ 2 ชนิดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดตามลำดับ จากนั้นนำไปใช้ทดลองในขั้นต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สารดูดซับจากขั้นตอนที่ 1 ทำการทดลองแบบแบตช์ (batch experiment) และขั้นตอนที่ 3 หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้ หอดูดซับทดลอง (adsorption column) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตกาแฟผงสำเร็จรูป ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านจากระบวนการผลิตทั้งหมดของโรงงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดมาก่อน เนื่องจากลักษณะสมบัติของน้ำเสียนั้นมีปริมาณตะกอนที่เป็นกากของเมล็ดกาแฟจำนวนมาก จึงนำมาผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการกรองทรายก่อน โดยใช้ทรายหยาบบรรจุที่ความสูง 20 เซนติเมตรที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.15 ลิตรต่อนาที จากนั้นนำมาวิเคราะห์ พีเอช สี ทีโอซี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย

การเตรียมวัสดุที่จะใช้ทดลอง

การเตรียมวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรชนิดต่างๆ ได้แก่ ชานอ้อย ชังข้าวโพด แ้วกล้วยดำ เปลือกไข่ไก่ หินภูเขาไฟ ถ่าน เยื่อกระดาษ และกากมะพร้าว เพื่อใช้เป็นสารดูดซับ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำสารดูดซับล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง
2. นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 6 เมช (3.35 มิลลิเมตร)
4. ล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วทำให้แห้งโดยการนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อรอกการนำไปใช้ต่อไป

ในส่วนของเปลือกไข่ไก่ลอกส่วนที่เป็นเยื่อเมมเบรนออก ทำการวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เป็นเปลือกไข่ไก่เท่านั้น คุณสมบัติของเปลือกไข่ไก่แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเปลือกไข่ไก่

ลักษณะทางกายภาพ	เปลือกไข่ไก่
พื้นที่ผิว (m ²)	0.2302
ขนาดรูพรุน (A°)	64,700
ความหนาแน่นใช้งาน (g/ml)	2.3515

ที่มา: จัตรลณี (2545)

โดยในทุกขั้นตอนของการทดลองทำการศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในระบบจริงได้ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ ถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบไม้ยางของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด สารดูดซับดังกล่าวก่อนนำไปใช้ในการทดลองจะนำมาล้างในน้ำสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้เย็นในโถสุญญากาศ ความชื้น คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพ	ถ่านกัมมันต์จากไม้ยาง
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	1.1254×10^3
ปริมาตรความพรุน (ml/g)	0.6352
ความหนาแน่นใช้งาน (g/ml)	1.04

ที่มา: บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด

แผนการทดลอง

1. การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของสารดูดซับ

ทำการศึกษาสารดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ ชานอ้อย ชังข้าวโพด แถ้แกลบดำ เปลือกไข่ไก่ หินภูเขาไฟ ถ่าน เยื่อกระดาษ กาบมะพร้าว และถ่านกัมมันต์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1.1 นำสารดูดซับชนิดต่างๆ ปริมาณ 5 กรัมลงในขวดชมพูขนาด 250 ลบ.ซม. แต่ละใบ
- 1.2 นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที
- 1.3 นำไปกรองเพื่อแยกสารดูดซับออก โดยใช้กระดาษกรองขนาด $0.45 \mu\text{m}$ แล้วนำไปวิเคราะห์สีในรูปของการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 400 nm อ้างอิงตาม Tokumura *et al.* (2006) โดยทำการวัดหาความเข้มข้นของสีโดยใช้ความยาวคลื่นที่ 400 nm เนื่องจากเป็นน้ำเสียประเภทเดียวกันจึงเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากัน
- 1.4 ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิม
- 1.5 คำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารดูดซับแต่ละชนิด เลือกสารดูดซับ 2 ชนิดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดตามลำดับเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้การทดลองแบบเบตซ์ ของสารดูดซับ 2 ชนิดจากข้อ 1 นำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) มีขั้นตอนดังนี้

2.1 นำน้ำเสียปริมาตร 100 ลบ.ซม. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. เติมสารดูดซับปริมาณ 5 กรัมลงในขวดแต่ละใบ

2.2 นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 และ 120 นาที

2.3 นำไปกรองเพื่อแยกสารดูดซับออกโดยใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 μm แล้วนำไปวิเคราะห์ที่ไอซีด้วยเครื่อง Total organic carbon analyzer (TOC – 5000A)

2.4 ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมโดยเปลี่ยนปริมาณสารดูดซับเป็น 10 15 และ 20 กรัมตามลำดับ

2.5 นำผลการทดลองข้างต้นที่ได้ไปเขียนกราฟสมการไอโซเทอมการดูดซับ

3. เปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง COD: TOC

ทำการศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง COD: TOC ของน้ำเสียก่อนการดูดซับและน้ำเสียหลังจากการดูดซับด้วยสารดูดซับ มีขั้นตอนดังนี้

3.1 นำน้ำเสียก่อนการดูดซับไปวิเคราะห์ COD และ TOC

3.2 นำน้ำเสียปริมาตร 100 ลบ.ซม. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. นำสารดูดซับที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ 1 ปริมาณ 20 กรัมลงในขวดแต่ละใบ

3.3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

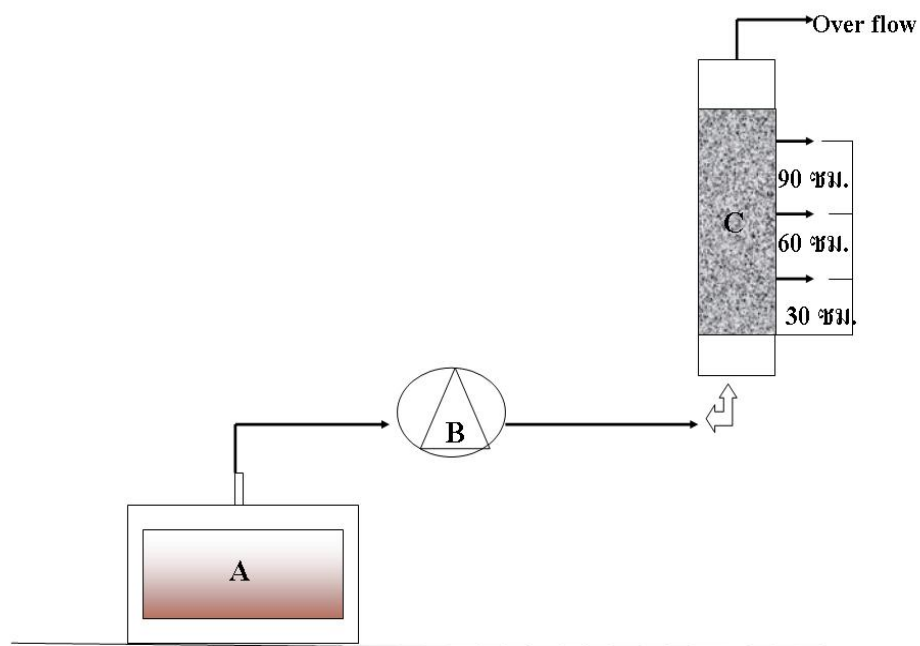
3.4 นำน้ำเสียไปวิเคราะห์ COD และ TOC

3.5 เปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง COD: TOC ของน้ำเสียก่อนการดูดซับและน้ำเสียหลังจากการดูดซับด้วยสารดูดซับ

4. ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของสารดูดซับโดยใช้หอดูดซับทดลอง (adsorption column)

หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของสารดูดซับโดยใช้หอดูดซับทดลอง โดยนำสารดูดซับทั้ง 2 ชนิดมาบรรจุลงในคอลัมน์ คอลัมน์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7.62 เซนติเมตร ความสูงขนาด 100 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัด 44.18 ตารางเซนติเมตร ด้านล่างของคอลัมน์มีตะแกรงละเอียดเพื่อรองรับสารดูดซับไม่ให้หลุดออกจากคอลัมน์ มีวาล์วปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกที่ความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 9 มีขั้นตอนดังนี้

- 4.1 บรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์ที่ความสูง 95 เซนติเมตร
- 4.2 ป้อนน้ำเสียแบบไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งน้ำเสียไหลล้นเต็มทั่วทั้งคอลัมน์
- 4.3 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทุกๆ 1 ชั่วโมงที่จุดความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- 4.4 นำน้ำเสียไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ทีโอซี พีเอช และของแข็งแขวนลอย
- 4.5 ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิม แต่เปลี่ยนอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร 3 ค่า
- 4.6 ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4.1- 4.5 แต่เปลี่ยนสารดูดซับเป็นชนิดต่อไป
- 4.7 หาประสิทธิภาพในการกำจัดที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรต่างๆ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์



สัญลักษณ์

A = ถังน้ำเสีย

B = ปั๊มน้ำ

C = สารดูดซับ

ภาพที่ 9 ลักษณะของหอดูดซับทดลอง (adsorption column)

การวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ สี ทีโอซี ซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย ซึ่งทำการวิเคราะห์ตาม Standard Methods of the Examination of water and wastewater (18th edition) (APHA, 1995)

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
สี	Spectrophotometric Method
ทีโอซี	Total organic carbon analyzer
ซีโอดี	Closed reflux
พีเอช	Electronic pH meter Method
ของแข็งแขวนลอย	Total suspended solids at 103-105°C

สถานที่ระยะเวลาทำการวิจัย

ทำการวิจัยภายในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป หลังจากผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการกรองทรายมีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 5

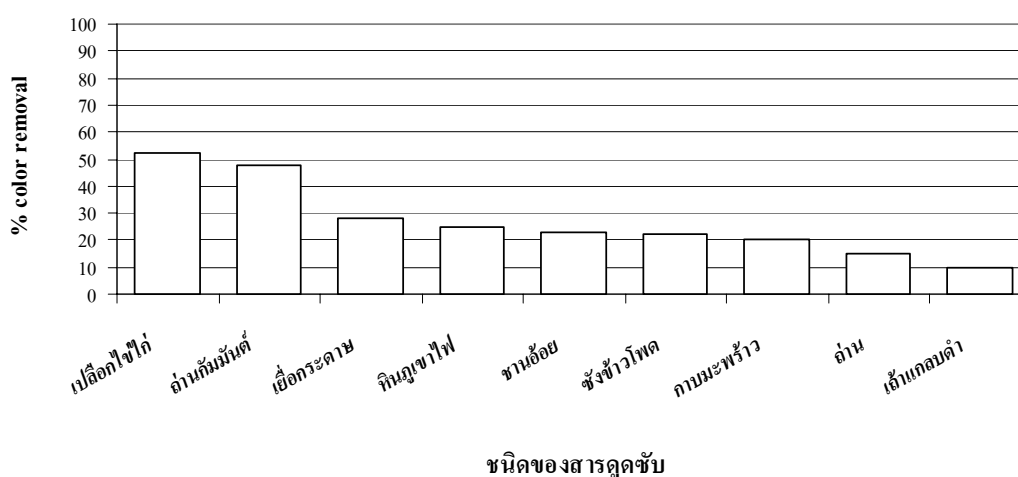
ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสีย	ลักษณะสมบัติ				
	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg.CO ₂ /l)	ซีโอดี (mg.O ₂ /l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
1	4.48	2.882	1547	3868	255
2	4.10	2.860	1315	3288	248
3	4.53	2.944	1560	3900	276
4	5.04	2.760	1439	3598	251
5	4.56	2.891	1496	3740	285
6	4.89	2.572	1460	3650	256
7	4.43	2.876	1378	3445	237
8	5.07	2.831	1591	3978	271
9	4.67	2.780	1450	3625	268
10	4.71	2.870	1483	3708	255
ค่าพิสัย	4.38-4.95	2.723-2.931	1388-1556	3154-3574	245.53-274.47
ค่าเฉลี่ย	4.65	2.827	1472	3680	260

พบว่าน้ำเสียมีค่าพีเอชที่ค่อนข้างต่ำอยู่ในสถานะที่เป็นกรด มีความเข้มของสีที่สูงมาก ความเข้มข้นของทีโอซีและซีโอดีสูง โดยที่ความเข้มข้นของซีโอดีสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กฎหมายกำหนด และน้ำเสียหลังจากผ่านการกรองทรายแล้วพบว่ายังคงมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำเสีย

1. การศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของสารดูดซับ

เนื่องจากโครงสร้างและองค์ประกอบรวมทั้งกลุ่มอนุพันธ์ในแต่ละวัสดุธรรมชาติมีความแตกต่างกันในการกำจัดสี ในขั้นตอนนี้พิจารณาเพียงการกำจัดสีเป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นเพื่อทดสอบว่าสารดูดซับชนิดใดมีความสามารถในการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปได้ พบว่าถ่านแกลบดำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้อยที่สุดเท่ากับ 10 % ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 15 % ส่วนกาบมะพร้าว ช้างข้าวโพด ชานอ้อยและหินภูเขาไฟมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 20 % 22 % 23 % และ 25 % ตามลำดับ โดยที่เปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากที่สุดเท่ากับ 52 % และ 28 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์พบว่ามีความสามารถในการกำจัดสีเท่ากับ 48 % และจากการทดลองในขั้นนี้จึงเลือกเปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษ รวมทั้งถ่านกัมมันต์มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ภาพที่ 10 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสารดูดซับแต่ละชนิด



ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสารดูดซับแต่ละชนิด

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในการทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ทำการศึกษาปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ โดยเปรียบเทียบจากค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ (B) แต่ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว (Furuya *et al.*, 1997)

เนื่องจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของทีโอซีของสารดูดซับที่จุดสมดุล โดยเปรียบเทียบจากค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ (k) และค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของสารดูดซับ ($1/m$) ได้ ซึ่งหาได้จาก Intercept และ $1/\text{Slope}$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชตามลำดับ ในการทดลองนี้จะพิจารณาเพียงความเข้มข้นของทีโอซีเนื่องจากความเข้มข้นของทีโอซีหลังจากผ่านการดูดซับแล้วสามารถนำไปทำนายค่าซีโอดีได้

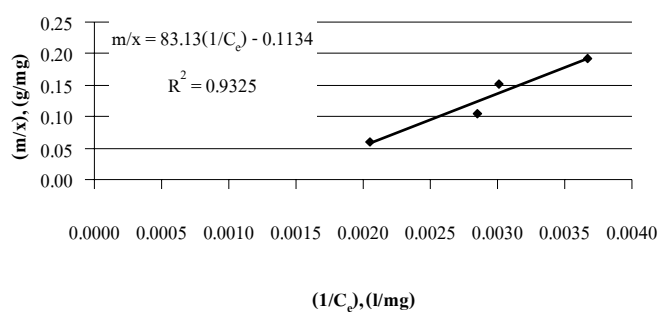
ปริมาณทีโอซีเริ่มต้นเท่ากับ 1315 มก. /ล. ผลการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับแสดงดังตารางที่ 5 และภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{x/m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ และภาพที่ 14 ถึงภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(x/m)$ บนแกนตั้ง หมายถึง จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับ และ $\log C_e$ บนแกนนอน หมายถึง ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล จากตารางที่ 6 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าเมื่อปริมาณของสารดูดซับมากขึ้น ความเข้มข้นของทีโอซีที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นน้อยลง

ตารางที่ 6 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

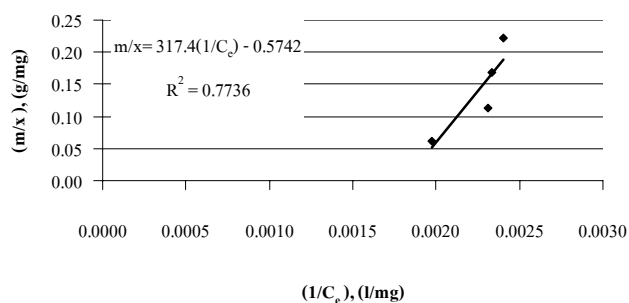
สารดูดซับ	m (g)	C_e (mg/l)	x (mg)	x/m (mg/g)	m/x (g/mg)	$1/C_e$	$\log (x/m)$	$\log C_e$
ถ่านกัมมันต์	5	487.81	82.720	16.5438	0.0604	0.0020	1.2186	2.6883
	10	350.83	96.418	9.6418	0.1037	0.0029	0.9842	2.5451
	15	332.66	98.234	6.5489	0.1527	0.0030	0.8162	2.5220
	20	272.21	104.024	5.2013	0.1923	0.0037	0.7158	2.4397
เปลือกไข่ไก่	5	506.69	80.832	16.1663	0.0619	0.0020	1.2086	2.7048
	10	432.94	88.206	8.8206	0.1134	0.0023	0.9455	2.6365
	15	428.63	88.637	5.9091	0.1692	0.0023	0.7716	2.6321
	20	415.71	89.930	4.4965	0.2224	0.0024	0.6529	2.6188
เชือกกระดาษ	5	512.57	80.243	16.0486	0.0623	0.0020	1.2055	2.7098
	10	357.95	94.909	9.4909	0.1054	0.0028	0.9773	2.5634

ตารางที่ 6 (ต่อ)

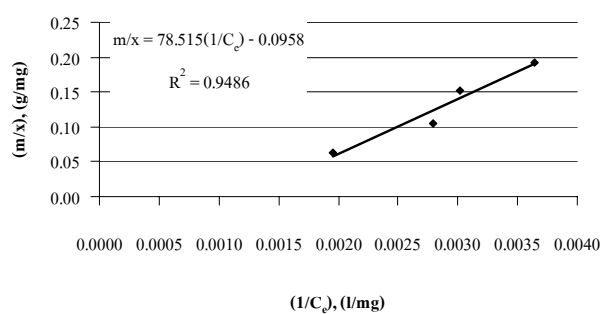
สารดูดซับ	m (g)	C _e (mg/l)	x (mg)	x/m (mg/g)	m/x (g/mg)	1/C _e	log (x/m)	log C _e
	15	331.55	98.346	6.5564	0.1525	0.0030	0.8167	2.5204
	20	274.42	104.059	5.2030	0.1922	0.0036	0.7163	2.4384



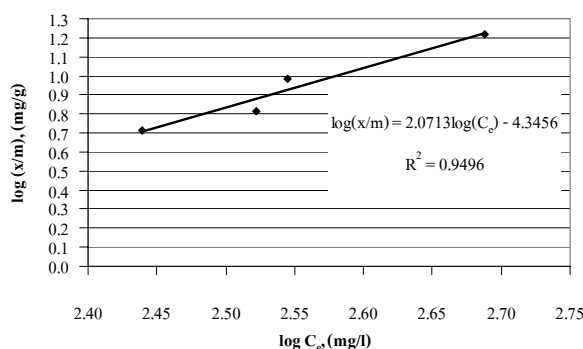
ภาพที่ 11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์



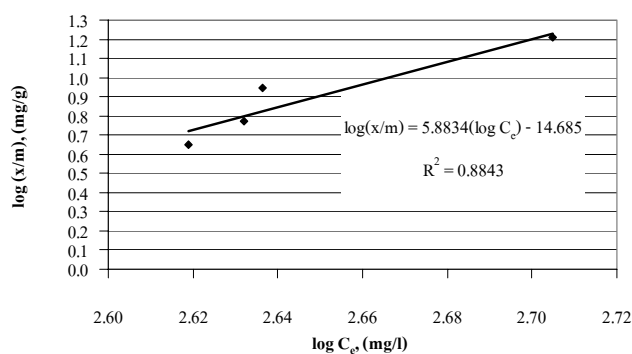
ภาพที่ 12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของเปลือกไข่ไก่



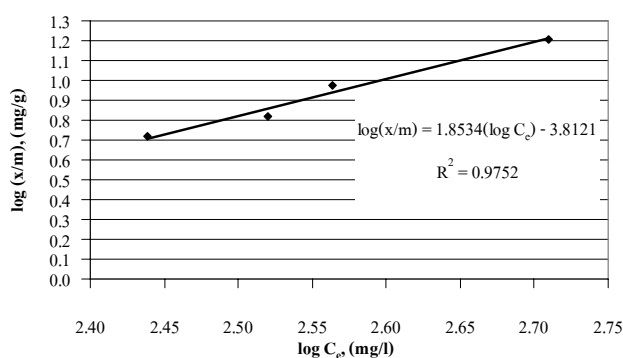
ภาพที่ 13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของเชื้อกระดาศ



ภาพที่ 14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของเปลือกไข่ไก่



ภาพที่ 16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของเยื่อกระดาษ

ตารางที่ 7 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอมการดูดซับ

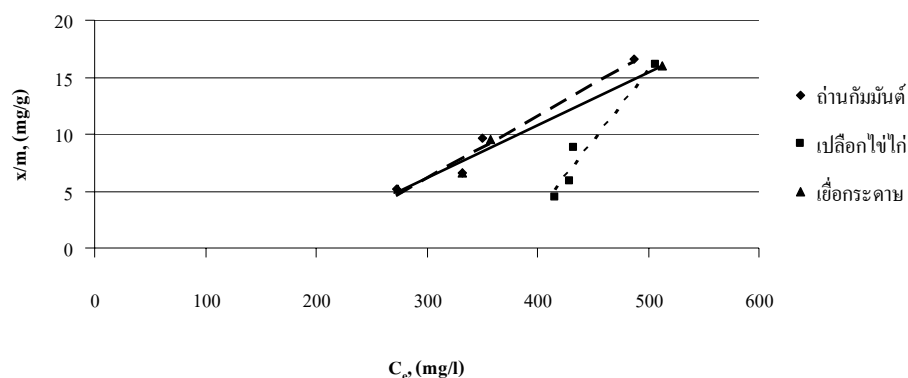
แบบฟรูนดิชมีความเหมาะสมมากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ จึงสามารถสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษเกิดการดูดซับแบบกายภาพ (physical adsorption) คือการดูดซับเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงแวน เดอ วาล์ว (van der waals) สามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น

ตารางที่ 7 สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และแบบฟรูนดิช

สารดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนดิช
	$\frac{x}{m} = \frac{aBC_e}{1 + BC_e}$	$\frac{x}{m} = KC_e^{1/n}$
ถ่านกัมมันต์	$\frac{x}{m} = \frac{(0.01235)C_e}{1 + 0.0014C_e}$	$\frac{x}{m} = (0.6380)C_e^{2.0713}$
เปลือกไข่ไก่	$\frac{x}{m} = \frac{(0.0031)C_e}{1 + 0.0018C_e}$	$\frac{x}{m} = (1.1669)C_e^{5.8834}$
เยื่อกระดาษ	$\frac{x}{m} = \frac{(0.0125)C_e}{1 + 0.0012C_e}$	$\frac{x}{m} = (0.5812)C_e^{1.8534}$

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอมแบบฟรูนดิชในการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด ทำการเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถในการดูดซับที่ไอโซแสดงได้ดังภาพที่ 17 และตารางที่ 8 แสดงผลสรุปของค่าคงที่การดูดซับแบบฟรูนดิช และความจุของการดูดซับที่ได้จากการทดลองนี้ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (C_e) ที่เท่ากัน (พิจารณาภาพที่ 17) พบว่าค่า $(x/m)_{\text{เปลือกไข่ไก่}} < (x/m)_{\text{เยื่อกระดาษ}} < (x/m)_{\text{ถ่านกัมมันต์}}$ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของสารดูดซับมีค่าเท่ากัน ที่ไอโซที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จะมีค่ามากกว่าที่ไอโซที่ถูกดูดซับด้วยเยื่อกระดาษและเปลือกไข่ไก่ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของไอโซเพิ่มมากขึ้นพบว่าเปลือกไข่ไก่มีค่า x/m มากที่สุดแสดงว่าที่ความเข้มข้นของไอโซสูงเปลือกไข่ไก่สามารถดูดซับได้ดีที่สุด แต่ในช่วงที่ความเข้มข้นต่ำ ถ่านกัมมันต์และเยื่อกระดาษมีความสามารถในการกำจัดที่ไอโซได้ดีกว่าเปลือกไข่ไก่

เมื่อพิจารณาที่ค่า (x/m) ที่เท่ากัน (พิจารณาภาพที่ 17) พบว่าค่า $(C_e)_{\text{เปลือกไข่ไก่}} > (C_e)_{\text{เยื่อกระดาษ}} > (C_e)_{\text{ถ่านกัมมันต์}}$ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของสารดูดซับมีค่าเท่ากัน ที่ไอโซที่จุดสมดุลของถ่านกัมมันต์มีค่าน้อยกว่าที่ไอโซที่จุดสมดุลของเยื่อกระดาษและเปลือกไข่ไก่ตามลำดับ



ภาพที่ 17 ผลเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 8 ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดิช และความจุของการดูดติดผิว

สารดูดซับ	ค่าคงที่ของการดูดติดผิว	
	k	1/n
ถ่านกัมมันต์	0.6380	2.0713
เปลือกไข่ไก่	1.1669	5.8834
เชื้อกระดาศ	0.5812	1.8534

จากตารางที่ 8 พบว่าค่า $1/n$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่ และเชื้อกระดาศมีค่าเท่ากับ 2.0713 5.8834 1.8534 ตามลำดับ ดังนั้นจากค่า $1/n$ ที่ได้พบว่าเส้นไอโซเทอมของเปลือกไข่ไก่มีความชันสูงสุด แสดงถึงขีดความสามารถในการดูดติดผิวได้ดีกว่าเชื้อกระดาศและถ่านกัมมันต์เมื่อใช้ปริมาณที่เท่ากัน และค่า k เป็นค่าความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่ และเชื้อกระดาศมีค่าเท่ากับ 0.6380 1.1669 0.5812 ตามลำดับ พบว่าเปลือกไข่ไก่มีค่า k สูงแสดงว่าเปลือกไข่ไก่มีความสามารถในการดูดซับที่ไอซีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ และเชื้อกระดาศที่มีค่า k ต่ำกว่า

3. เปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง COD: TOC

ทำการศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง COD: TOC ของน้ำเสียก่อนการดูดซับและน้ำเสียหลังจากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่แสดงดังตารางที่ 9 เพื่อทำการศึกษาว่าหลังจากการดูดซับไปแล้วนั้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารอินทรีย์ชนิดใด ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) หมายถึงปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ยกเว้นสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) บางชนิด (ไพทूरย์, 2550) และค่าทีโอซี (total organic carbon, TOC) หมายถึง สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเผาสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน, 2548) พบว่าน้ำเสียหลังจากการดูดซับทั้งของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่มีสัดส่วนระหว่าง COD: TOC ลดลง แสดงว่าสารที่ถูกดูดซับมีทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น halogen (F^- , Cl^- , Br^-), NO_3^- , S^{2-} และ Fe^{2+} แต่สามารถถูกออกซิไดส์ได้ด้วยโปแตสเซียมไดโครเมต (กรองแก้วและพิสมัย, 2544) สอดคล้องกับที่ Naczek and Shahidi (2004) ได้กล่าวไว้ว่า เมล็ดกาแฟนั้นมีสารประกอบฟีนอลิก จัดอยู่ในจำพวกสารอินทรีย์ มีโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก ของ di- หรือ tri-hydroxyl-phenol เชื่อมโดย $-O-$, $-CH_2-$, $-NH-$, $-N=$, $-S-$, $C=O$

ตารางที่ 9 สัดส่วนระหว่าง COD: TOC ของตัวอย่างน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสีย	TOC (mg.O ₂ /l)	COD (mg.O ₂ /l)	COD:TOC	ค่าพิสัย (n)
น้ำเสียเข้าระบบ	1037	3264	3.15	3.13-3.17 (3)
หลังดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	312	896	2.87	2.86-2.88 (3)
หลังดูดซับด้วยเปลือกไข่ไก่	467	1326	2.84	2.83-2.85 (3)

4. การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดของสารดูดซับ โดยใช้หอดูดซับทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้หอดูดซับทดลองแบบแท่งซึ่งมีการป้อนน้ำเสียไหลขึ้น เพื่อให้สารดูดซับและน้ำเสียมีการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงและการบำบัดขึ้นต้นด้วยวิธีการกรองทรายนั้นไม่ได้กำจัดปริมาณของแข็งแขวนลอยจนหมด ถ้าใช้การป้อนน้ำเสียไหลลงตัวดูดซับจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองอาจทำให้ระบบเกิดการอุดตันได้ ซึ่งถ้าออกแบบระบบแบบไหลลงต้องมีการล้างย้อนระบบ

อีกทั้งเป็นลดการสูญเสียเฮดจากของแข็งแขวนลอย สารดูดซับที่ใช้คือ ถ่านกัมมันต์ และเปลือกไข่ไก่ โดยในขั้นตอนนี้ไม่นำเยื่อกระดาษมาทำการทดสอบ เนื่องจากคุณลักษณะของเยื่อกระดาษที่อ่อน ยู่่ง่าย เมื่อนำมาบรรจุลงในหอดูดซับทดลองอาจเกิดเชื้อราขึ้นได้ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในขั้นตอนนี้

ทำการทดลองที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ตามลำดับ อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรของเปลือกไข่ไก่มีค่าเท่ากับ 0.22, 0.43 และ 0.65 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ตามลำดับ

4.1 ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.11 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์

4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.11 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีสูงที่สุดเท่ากับ 27.62% 98.39% และ 99.44 % ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีลดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 1.71% 11.62% และ 32.48% ตามลำดับ ซึ่งที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. พบว่าในช่วง 6 ชั่วโมงแรกน้ำทิ้งมีลักษณะที่ใสมากกว่าความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. และ 60 ซม. แต่เมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้นน้ำเสียมีลักษณะเริ่มเป็นสีน้ำตาลอ่อนจากนั้นเข้มมากขึ้น เปรียบเทียบกับที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 60 ซม. พบว่าน้ำเสียมีลักษณะใสเพียง 3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น ส่วนที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. พบว่าน้ำเสียที่เวลาการดูดซับต่างๆ มีลักษณะของสีน้ำตาลเข้มที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.11 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ ค1

แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดสีได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดสีได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง13 และภาพที่ 18

4.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีในน้ำทิ้งที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีสูงที่สุดเท่ากับ 91.22% 96.07% และ 99.55 % ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีลดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 66.27% 73.89% และ 87.31% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดที่โอซีได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดที่โอซีได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง13 และภาพที่ 19

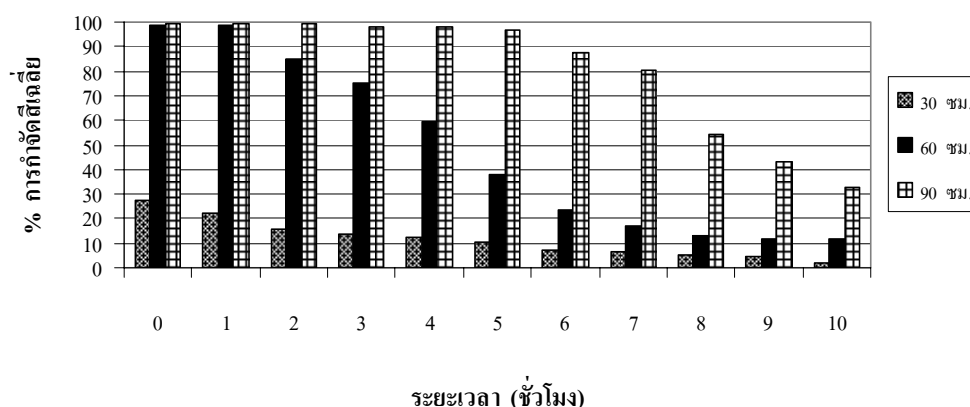
4.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับ 76.19% 86.75% และ 95.89 % ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 14.38% 64.42% และ 79.86% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง13 และภาพที่ 20

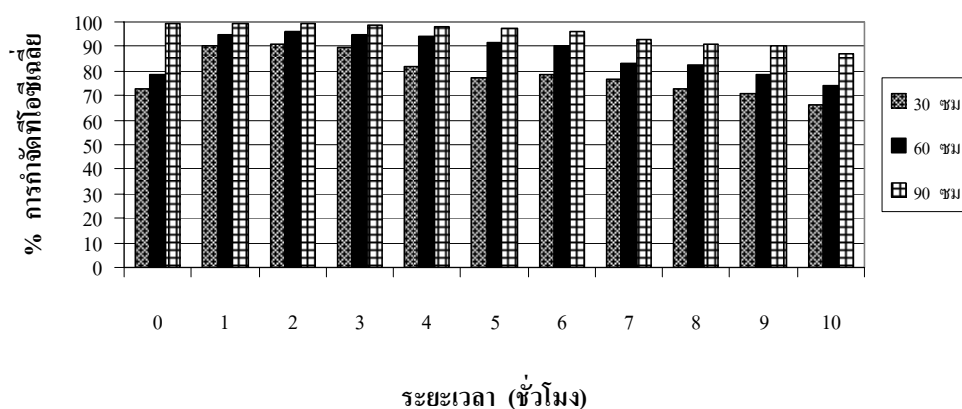
4.1.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

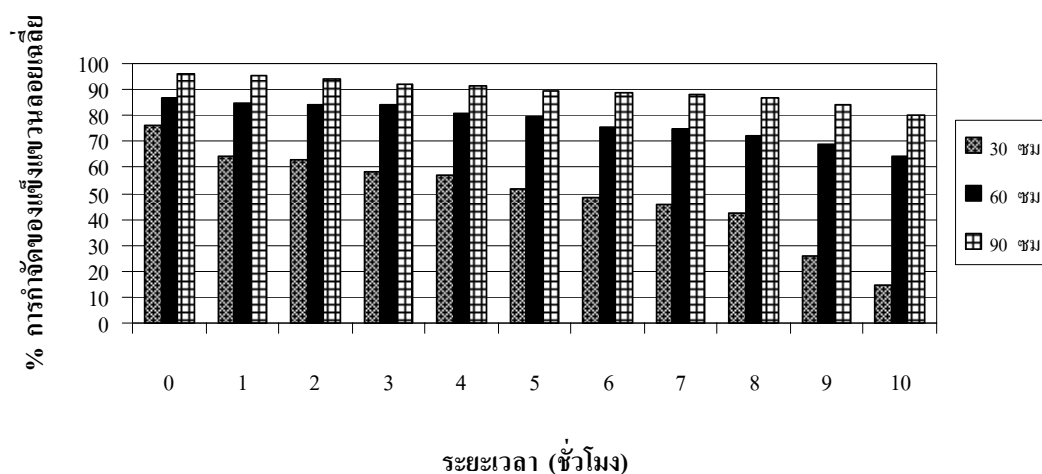
มีค่าเท่ากับ 7.99 8.52 และ 8.50 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมงพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 7.49 8.09 และ 8.37 ตามลำดับ แนวโน้มค่าพีเอชลดลงตามระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพผนวกที่ 13 และภาพที่ 21



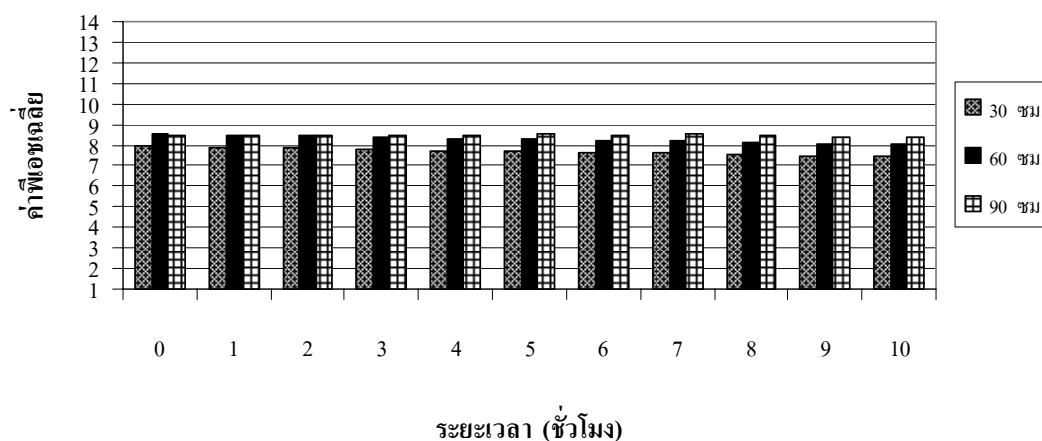
ภาพที่ 18 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 19 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 20 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 21 ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$

4.2 ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์

4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดดี

ประสิทธิภาพการกำจัดดีในน้ำทิ้งที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดดีสูงสุดเท่ากับ 21.05% 92.15% และ 99.30% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10

ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีย้อมลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 9.55% 15.09% และ 20.88% ตามลำดับ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม.พบว่าในช่วง 2 ชั่วโมงแรก น้ำเสียมีลักษณะที่ใสมากกว่าความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. และ 60 ซม. แต่เมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น น้ำเสียมีลักษณะเริ่มเป็นสีน้ำตาลอ่อนจากนั้นเข้มมากขึ้น เปรียบเทียบกับที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 60 ซม.และที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. พบว่าน้ำเสียที่เวลาการดูดซับต่างๆ มีลักษณะของสีน้ำตาลเข้มที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ ค2

แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดสีได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดสีได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง14 และภาพที่ 22

4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีในน้ำทิ้งที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดทีโอซีสูงที่สุดเท่ากับ 90.77% 95.74% และ 99.53% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดทีโอซีลดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 62.93% 74.03% และ 77.57% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดทีโอซีได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดทีโอซีได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง14 และภาพที่ 23

4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

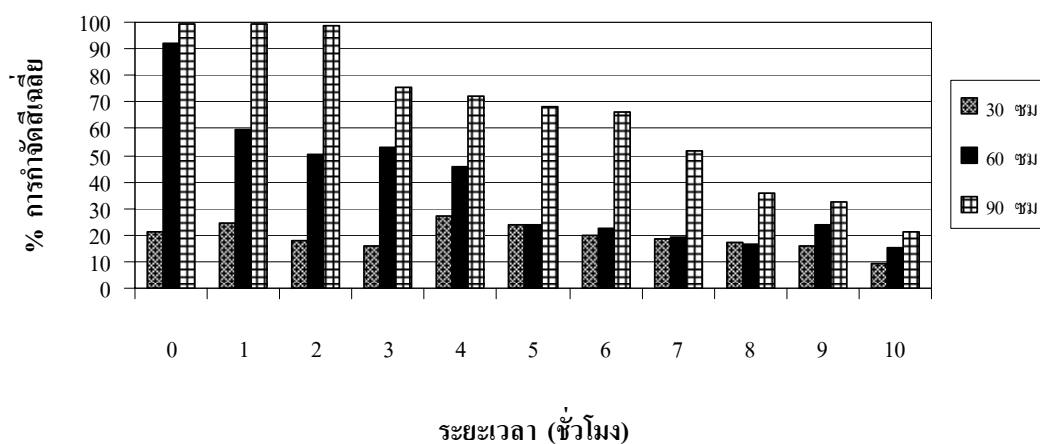
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับ 71.04% 85.78% และ 96.53%

ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลง มีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 22.59% 60.55% และ 71.92% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง14 และภาพที่

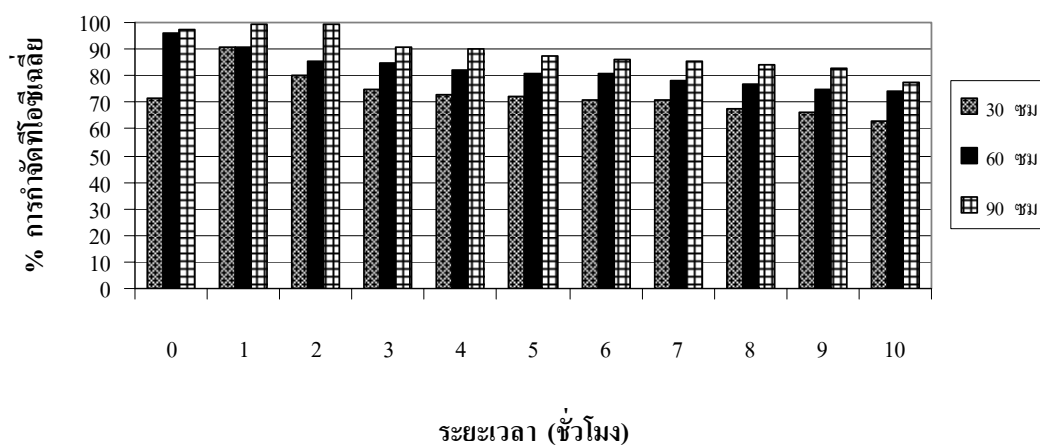
24

4.2.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

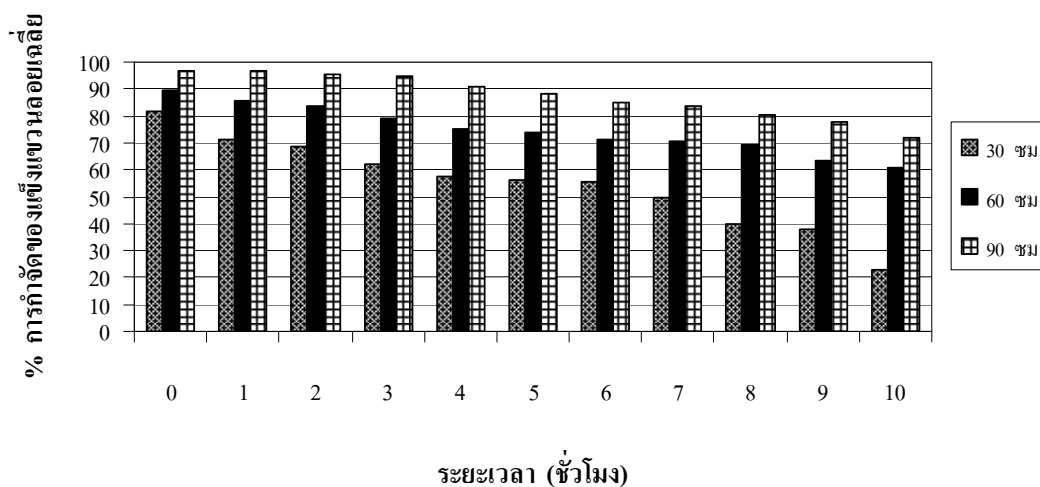
จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 7.71 8.25 และ 8.35 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 7.21 7.70 และ 8.06 ตามลำดับ แนวโน้มค่าพีเอชลดลงตามระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง14 และภาพที่ 25



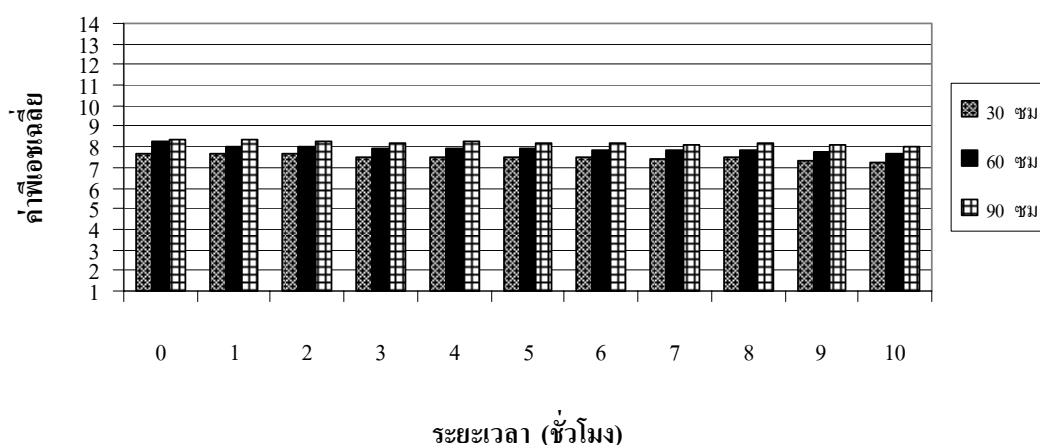
ภาพที่ 22 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 23 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 24 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 25 ผลการเปรียบเทียบค่าพิเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

4.3 ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์

4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดดี

ประสิทธิภาพการกำจัดดีในน้ำเสียที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดดีสูงสุดเท่ากับ 22.85% 80.77% และ 98.79% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10

ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสปีดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสปีดเท่ากับ 1.73 % 7.71% และ 9.04% ตามลำดับ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม.พบว่าในช่วงชั่วโมงแรกน้ำเสียมีลักษณะที่ใสมากกว่าความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. และ 60 ซม. แต่เมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้นน้ำเสียมีลักษณะเริ่มเป็นสีน้ำตาลอ่อน จากนั้นเข้มมากขึ้น เปรียบเทียบกับที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 60 ซม. และที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. น้ำทิ้งที่เวลาการดูดซับต่างๆ มีลักษณะของสีน้ำตาลเข้มที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ ก3

แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสปีดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดสปีดได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดสปีดต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสปีดเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง15 และภาพที่ 26

4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีในน้ำเสียที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดทีโอซีสูงที่สุดเท่ากับ 90.07% 90.26% และ 99.70% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดทีโอซีลดลงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 42.58% 46.31% และ 54.89% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดทีโอซีได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดทีโอซีได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ ง15 และภาพที่ 27

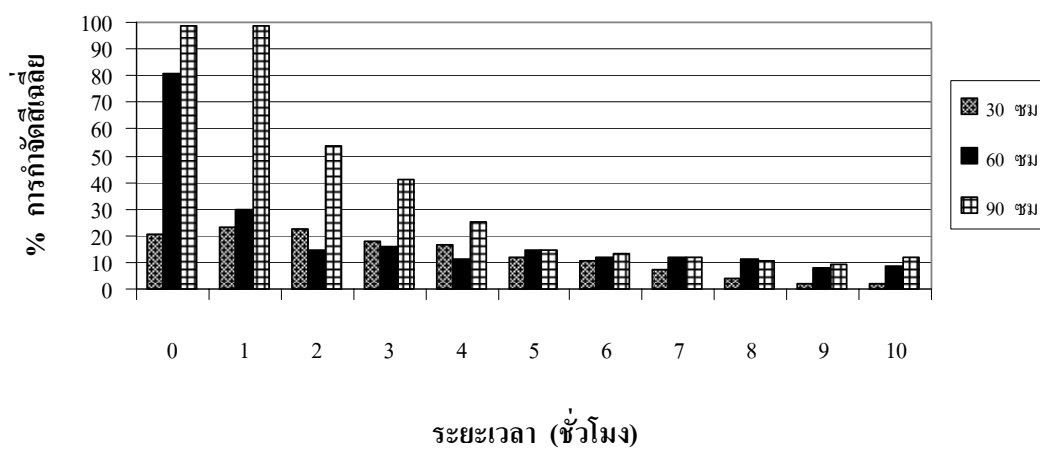
4.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับ 64.83% 77.80% และ 92.30%

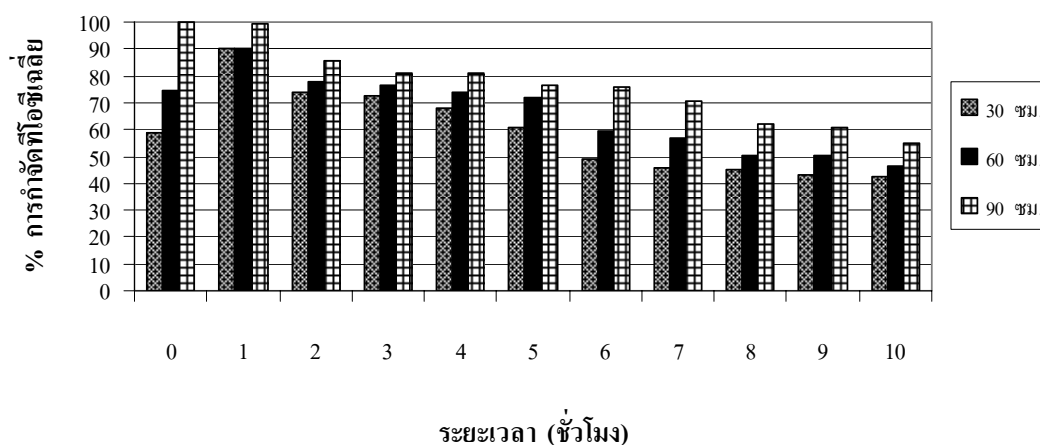
ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลง มีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 33.60% 47.18% และ 56.49% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ 15 และภาพที่ 28

4.3.4 ค่าฟิเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

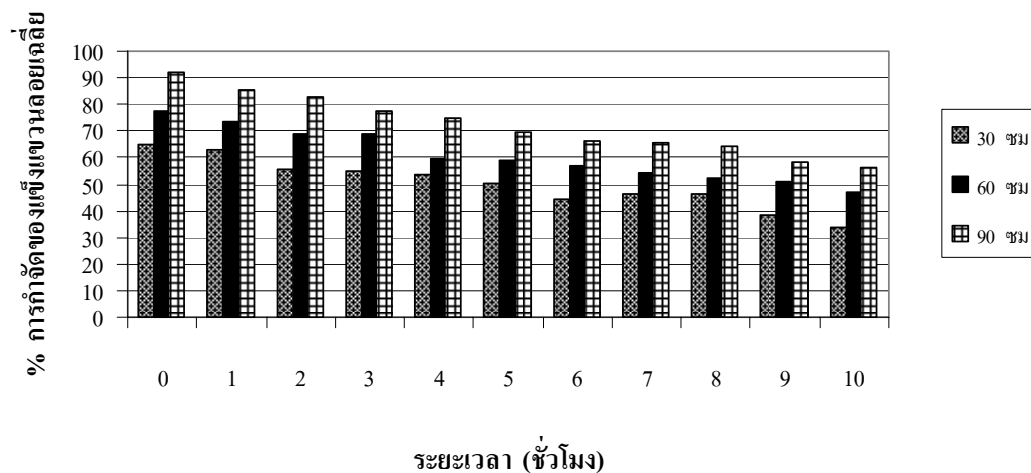
จากการทดลองพบว่าค่าฟิเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าฟิเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 7.67 7.93 และ 8.23 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าฟิเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 6.54 7.18 และ 7.37 ตามลำดับ แนวโน้มค่าฟิเอชลดลงตามระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าฟิเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงดังภาคผนวกที่ 15 และภาพที่ 29



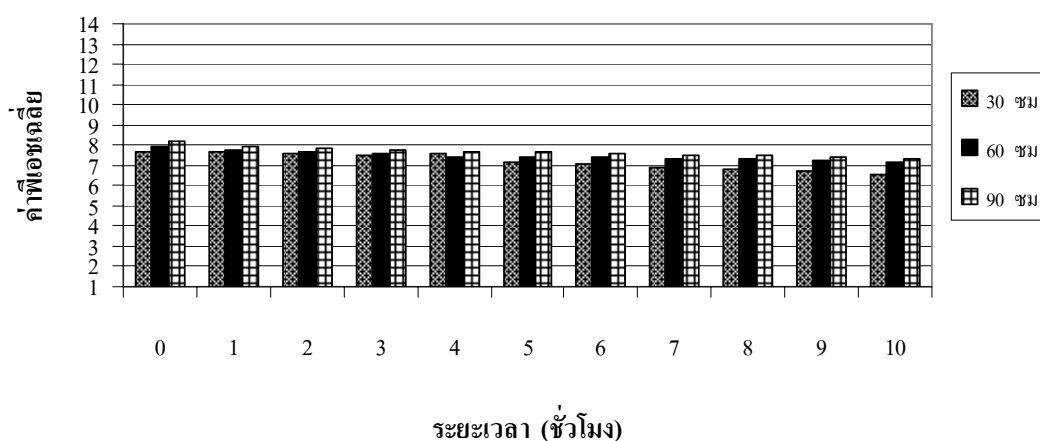
ภาพที่ 26 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 27 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 28 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 29 ผลการเปรียบเทียบค่าพิเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$

4.4 ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพ

เฉลี่ยในการกำจัดที่สูงที่สุดเท่ากับ 48.21% 62.38% และ 73.59% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 23.74% 49.10% และ 53.21% ตามลำดับ ซึ่งแต่ละชั้นความสูงของเปลือกไข่ไก่มีลักษณะสีที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ ก4 แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่เฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง16 และภาพที่ 30

4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีที่สูงที่สุดเท่ากับ 74.01% 85.54% และ 86.85% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 55.68% 68.53% และ 68.53% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดที่โอซีได้ใกล้เคียงกับที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 60 ซม. และที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีต่ำที่สุด ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง16 และภาพที่ 31

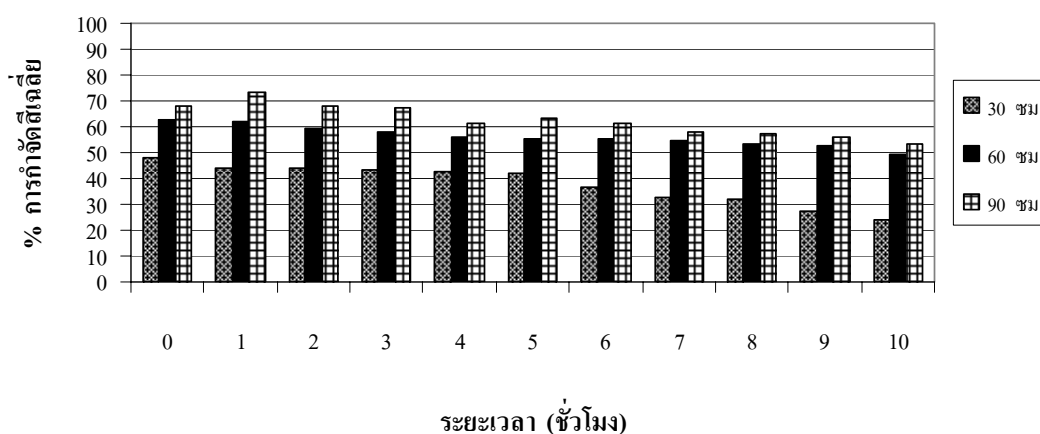
4.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอย

ประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอยในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแฉะแขวนลอยที่สูงที่สุดเท่ากับ 59.45% 63.00% และ 73.59% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแฉะแขวนลอยลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแฉะแขวนลอยเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 23.74% 49.10% และ 53.21% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอยจะลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแฉะแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแฉะแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการ

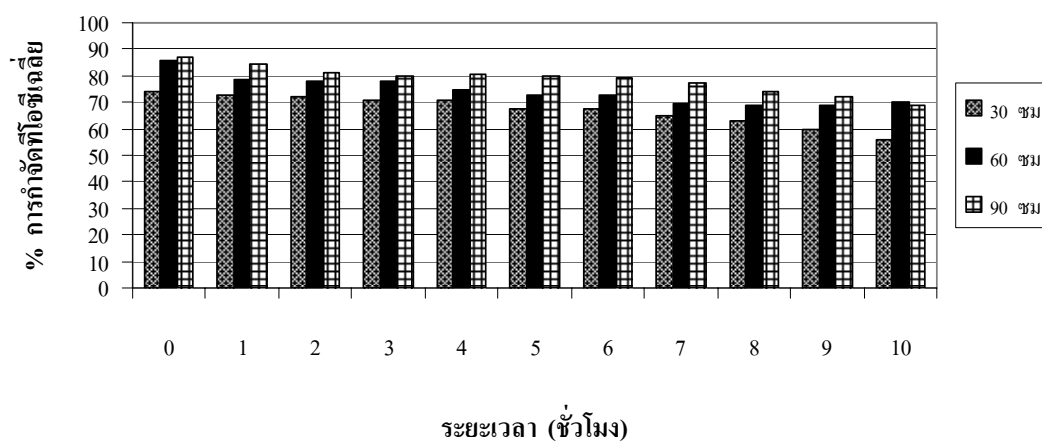
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ แสดงดังภาคผนวกที่ 16 และภาพที่ 32

4.4.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

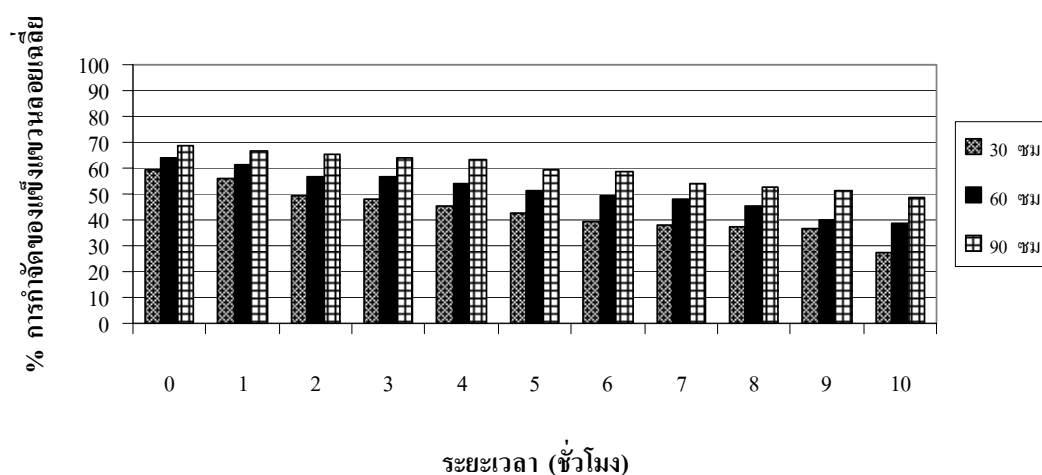
จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของ ชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 6.98 7.35 และ 7.79 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าพีเอชของน้ำ เสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 6.69 6.84 และ 7.08 ตามลำดับ แนวโน้มค่าพีเอชลดลงตาม ระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอช เฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ 16 และภาพที่ 33



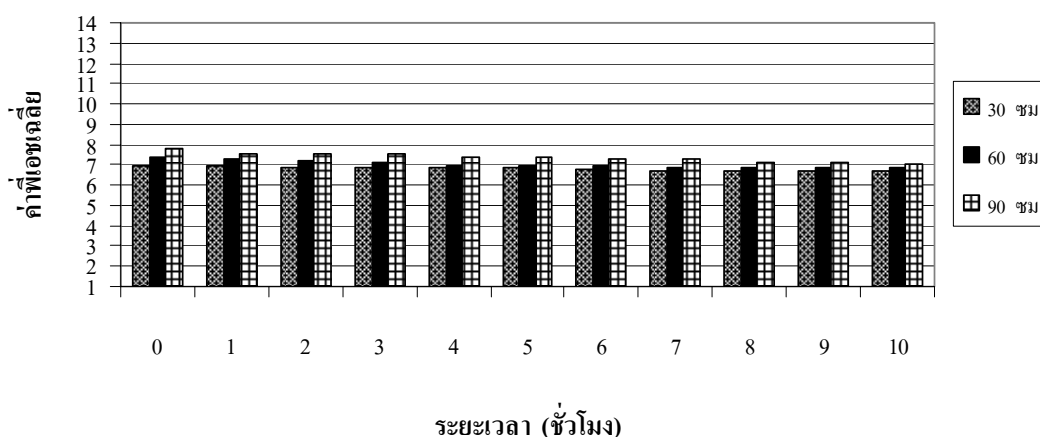
ภาพที่ 30 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 31 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของ
ชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 32 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของ
ชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$



ภาพที่ 33 ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่
ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

4.5 ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่

4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีสูงที่สุดเท่ากับ 39.05% 59.99% และ 69.30% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 17.19% 32.11% และ 44.14% ตามลำดับ ซึ่งแต่ละชั้นความสูงของเปลือกไข่ไก่อ้น้ำเสียนี้อาจมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.4308 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ ค5 แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง17 และภาพที่ 34

4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพ

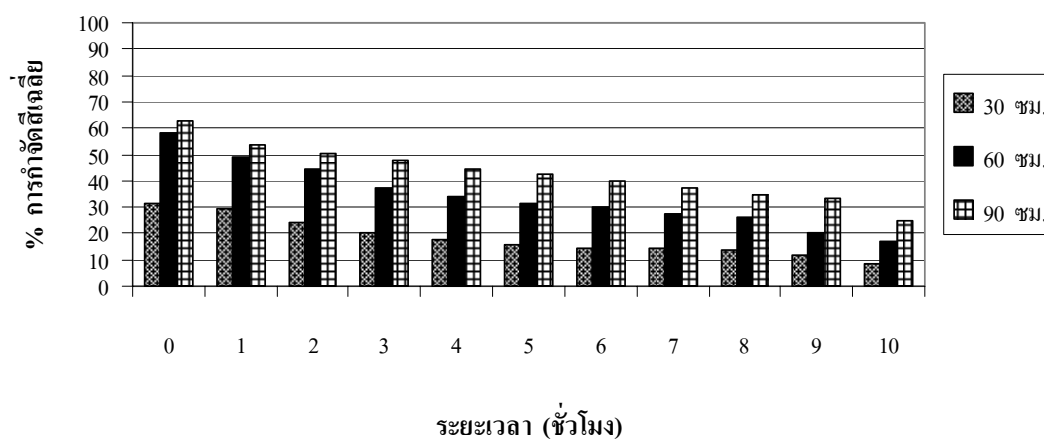
เฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีสูงที่สุดเท่ากับ 73.31% 78.88% และ 84.77% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 53.43% 59.76% และ 68.04% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้นและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดที่โอซีสูงที่สุด ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง17 และภาพที่ 35

4.5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอย

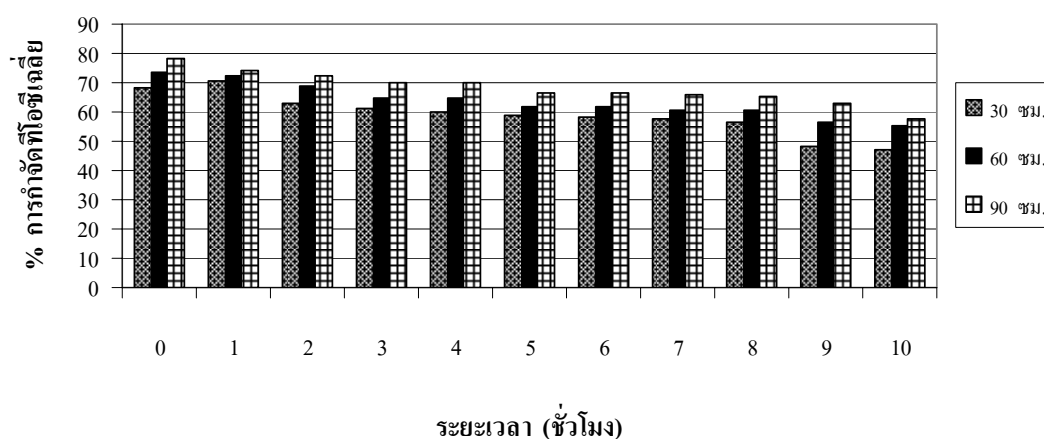
ประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอยในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแฉะแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับ 59.37% 60.95% และ 62.88% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแฉะแขวนลอยลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแฉะแขวนลอยเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 29.27% 34.79% และ 42.54% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอยลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแฉะแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแฉะแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแฉะแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง17 และภาพที่ 36

4.5.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

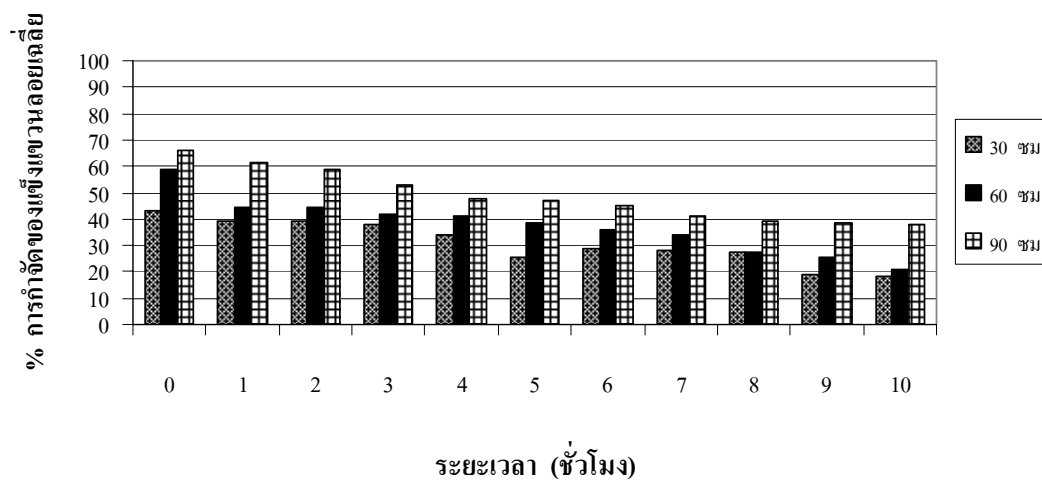
จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 6.86 7.21 และ 7.74 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 6.48 6.76 และ 6.86 ตามลำดับ แนวโน้มค่าพีเอชลดลงตามระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ ง17 และภาพที่ 37



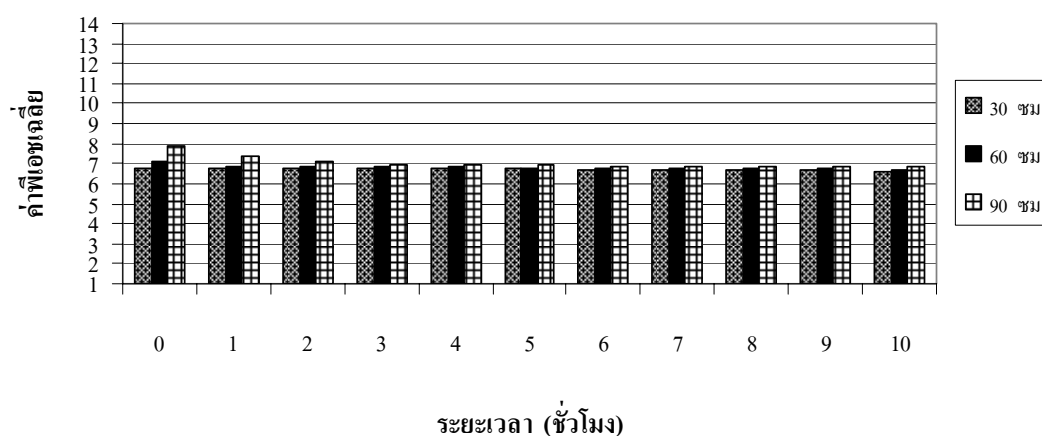
ภาพที่ 34 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งเจือปนในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 35 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอชีเจื้อยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 36 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาณ $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 37 ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาณ $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

4.6 ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาณ $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่

4.6.1 ประสิทธิภาพการกำจัด

ประสิทธิภาพการกำจัดในน้ำเสียที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาณ $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพ

เฉลี่ยในการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับ 31.42% 57.98% และ 62.86% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสีลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 8.41% 17.26% และ 24.89% ตามลำดับ ซึ่งแต่ละชั้นความสูงของเปลือกไข่ไก่มีลักษณะสีที่ไม่แตกต่างกัน ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ แสดงดังภาคผนวกที่ 66 แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ 18 และภาพที่ 38

4.6.2 ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซี

ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีสูงสุดเท่ากับ 70.54% 73.39% และ 78.05% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมงพบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดที่โอซีลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 47.26% 55.16% และ 57.47% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้นและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดที่โอซีสูงสุด ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ 18 และภาพที่ 39

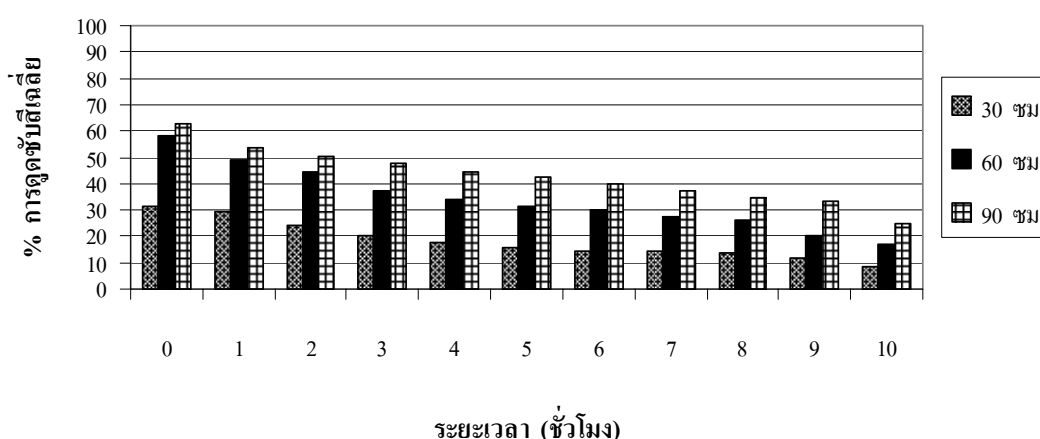
4.6.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ พบว่าที่ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดเท่ากับ 43.04% 58.51% และ 66.33% ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลงมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 18.10% 20.90% และ 37.75% ตามลำดับ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยลดลงเมื่อเวลาการดูดซับมากขึ้น ความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุด และมีความสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการ

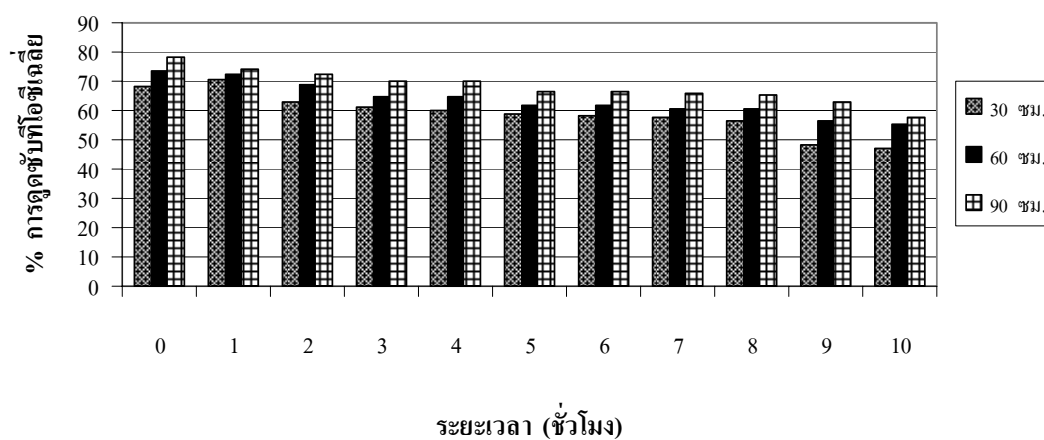
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ แสดงดังภาคผนวกที่ 18 และภาพที่ 40

4.6.4 ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

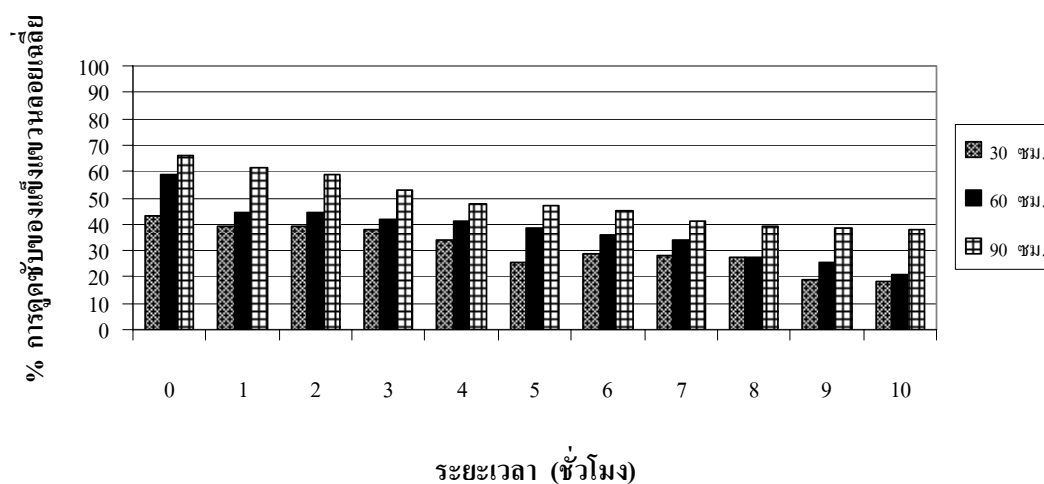
จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสูงของ ชั้นเปลือกไข่ไก่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ในเวลาที่ 0 ชั่วโมงค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมี ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 6.81 7.12 และ 7.89 ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเท่ากับ 6.63 6.70 และ 6.84 ตามลำดับ แนวโน้มค่าพีเอชจะลดลงตาม ระยะเวลาการดูดซับที่มากขึ้นและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ลดลง ผลการเปรียบเทียบค่าพีเอช เฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาคผนวกที่ 18 และภาพที่ 41



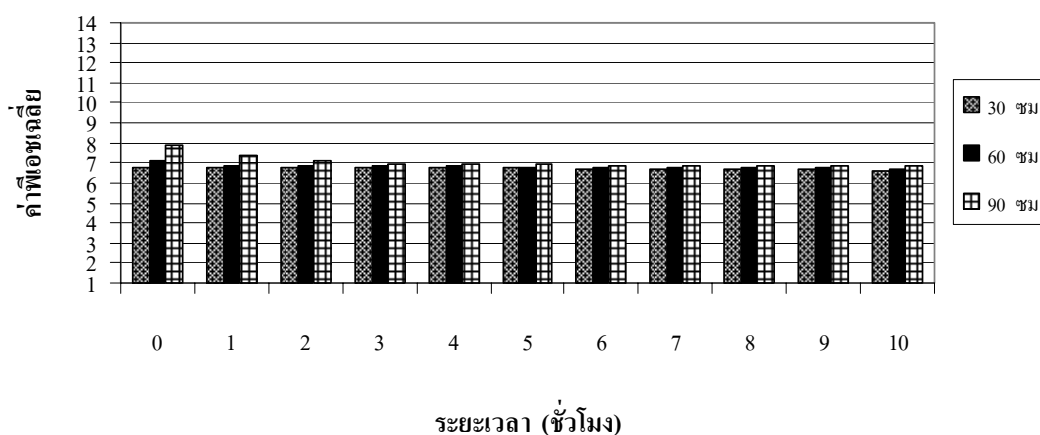
ภาพที่ 38 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 39 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีเจลลี่ในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 40 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแวนลอยเจลลี่ในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ ที่อัตราการน้ำเลี้ยงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$



ภาพที่ 41 ผลการเปรียบเทียบค่าพิเอซเฉลี่ยในแต่ละความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่
ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

จากผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสี ที่โอซี และของแข็งแขวนลอยของสารดูดซับโดยหอดูดซับทดลอง เมื่อพิจารณาที่ความสูงของชั้นสารดูดซับเท่ากัน พบว่าที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ และ $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่ตามลำดับมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ที่โอซี และของแข็งแขวนลอยได้ดี เนื่องจากที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรต่ำการถ่ายเทมวลของอนุภาคในน้ำทิ้งที่ช้ากว่าอัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตรสูง ทำให้อนุภาคในน้ำเสียถูกดูดซับที่ผิวได้นานกว่า

ที่ความสูงของชั้นสารดูดซับที่ 90 ซม.มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ที่โอซี และของแข็งแขวนลอยได้ดีที่สุด เนื่องจากที่ความสูง 90 ซม. น้ำเสียมีเวลาที่สัมผัสกับสารดูดซับได้นานกว่า ทำให้มีโอกาสได้สัมผัสกับสารดูดซับได้มากขึ้น โดยในช่วงแรก ๆ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในช่วงหลังๆ เพราะในช่วงแรกพื้นที่ผิวของสารดูดซับยังมีมากพอที่จะสามารถดูดซับอนุภาคในน้ำเสียได้ แต่เมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้นสารอนุภาคในน้ำเสียสัมผัสกับสารดูดซับมากขึ้น ทำให้ช่องว่างของสารดูดซับน้อยลง อนุภาคในน้ำเสียถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้นช่องว่างของสารดูดซับน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้อยลง

ส่วนค่าพิเอซของน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าต่ำแสดงดังตารางที่ 5 ค่าพิเอซเฉลี่ยของน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 4.65 โดยที่พื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีประจุบวกเมื่อน้ำเสียได้สัมผัสกับสารดูดซับมีการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ในช่วงแรกน้ำเสียที่ผ่านระบบแล้วมีค่าพิเอซที่สูงขึ้น แต่เมื่อเวลา

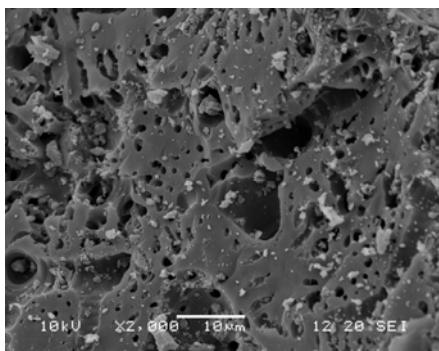
ลัมผัสงานขึ้นค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านระบบทดลองเนื่องจากสารดูดซับมีความเป็นกลางมากขึ้น ที่ความสูงของชั้นสารดูดซับ 90 ซม.มีค่าพีเอชสูงกว่าที่ความสูง 60 ซม.และ 30 ซม. ตามลำดับ

เสรีย์ (2548) อ้างถึง Hung and Wu (1977) ในการอธิบายถึงสาเหตุของพีเอชที่เพิ่มขึ้นของสารละลายภายหลังการเติมถ่านกัมมันต์ว่า บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบเอช จะมีกลุ่มฟังก์ชันนอลซึ่งอยู่ในรูปของ C_xO และ C_xO_2 เมื่อสัมผัสกับน้ำในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางหรือสภาวะที่เป็นกรด กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เหล่านี้ จะไปออกซิไดส์โมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบ ๆ ถ่านกัมมันต์ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 15

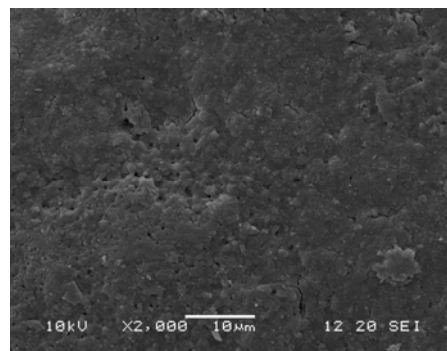


จากสมการที่ 15 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและกลุ่มฟังก์ชันนอลบนผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออนขึ้น เป็นผลให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยสมการที่ 15 ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลของพีเอชที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมถ่านกัมมันต์ลงไป在水เสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

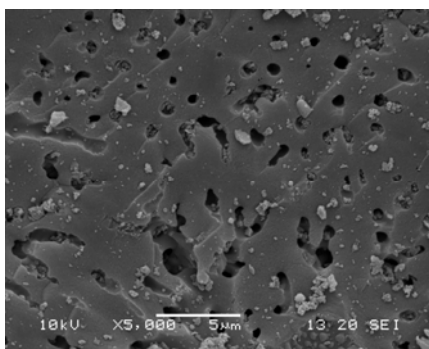
เมื่อพิจารณาที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรและความสูงของชั้นสารดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ทีโอซี และของแข็งแขวนลอยดีกว่าเปลือกไข่ไก่ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชที่พบว่าถ่านกัมมันต์มีความจุในการดูดซับมากกว่าเปลือกไข่ และจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิว และรูพรุนของสารดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope: SEM) พบว่าโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และบางส่วนมีลักษณะที่เป็นโพรงขนาดใหญ่ มีบางส่วนของพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบ และโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่พบว่าบริเวณพื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระ บางส่วนมีลักษณะที่เป็นรูพรุนจำนวนเล็กน้อยทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แต่ไม่มีลักษณะที่เป็นโพรงขนาดใหญ่ ภาพที่ 42 แสดงลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่ที่กำลังขยายต่างๆ กัน จากลักษณะโครงสร้างที่กล่าวมาพบว่าโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะที่เป็นรูพรุนและโพรงที่มากกว่าโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่ ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ทีโอซี และของแข็งแขวนลอยดีกว่า



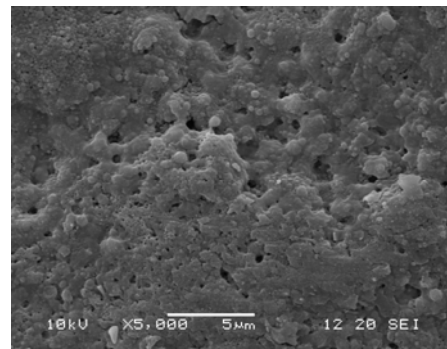
(1)



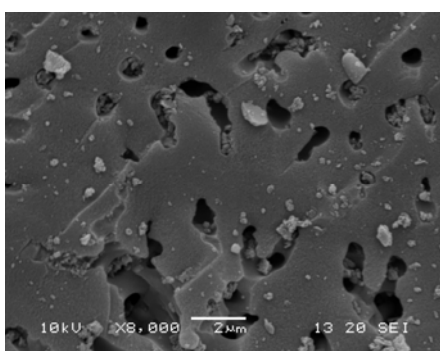
(2)



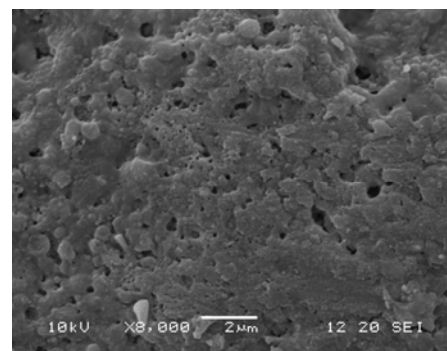
(3)



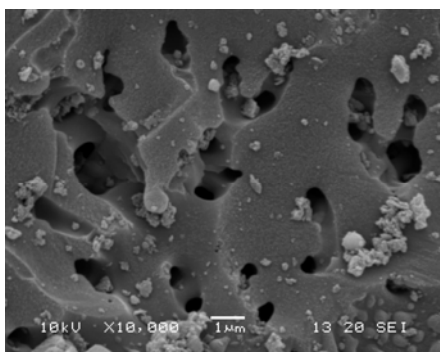
(4)



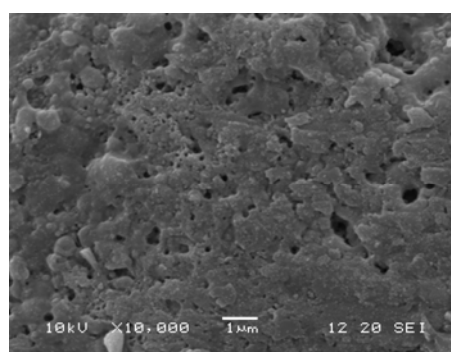
(5)



(6)



(7)

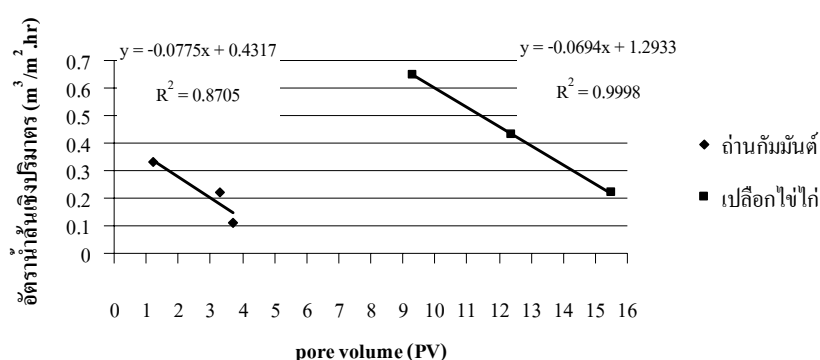


(8)

ภาพที่ 42 โครงสร้างของพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (1, 3, 5, 7) และเปลือกไข่ไก่ (2, 4, 6, 8)

5. ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore volume (PV) และอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ความสูงของชั้นสารดูดซับ 90 ซม.

ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีขึ้นกับปริมาณสารดูดซับที่บรรจุภายในคอลัมน์แล้ว อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรก็ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งด้วย ภาพที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PV และอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ความสูงของชั้นสารดูดซับ 90 ซม. โดยที่ความพรุนของถ่านกัมมันต์และเปลือกไขไก่มีค่าเท่ากับ 0.8952 และ 0.4642 ตามลำดับ



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง PV และอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ความสูงของชั้นสารดูดซับ 90 ซม.

ในระบบจริงสามารถที่จะกำหนดค่า C/C_0 ที่เหมาะสมได้ขึ้นกับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ในการทดลองนี้พิจารณาที่ความเข้มข้นของทีโอซีที่จุดเบรคทูร 90% ($C/C_0 = 0.1$) ของถ่านกัมมันต์ และที่ความเข้มข้นของทีโอซีที่จุดเบรคทูร 70% ($C/C_0 = 0.3$) ของเปลือกไขไก่จากภาพที่ 43 พบว่า เมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่มากขึ้น ปริมาณน้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้น ความเข้มข้นทีโอซีของน้ำทิ้งค่อยๆ มีความเข้มข้นสูงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เวลาที่จุดเบรคทูรน้อยลงตามอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรมากขึ้นเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับสารดูดซับน้อยลง เมื่อพิจารณาที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.11, 0.22 และ 0.33 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 90 ซม. พบว่าปริมาณน้ำที่เข้าระบบที่เท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดเบรคทูรคิดเป็นปริมาณน้ำทิ้งที่เข้าระบบเท่ากับ 3.69 PV, 3.28 PV และ 1.22 PV ตามลำดับ ส่วนที่ความสูงของชั้นเปลือกไขไก่ 90 ซม. ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร 0.22, 0.43 และ 0.65 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ปริมาณน้ำที่เข้าระบบที่เท่ากับค่าความเข้มข้นของทีโอซีที่จุดเบรคทูรคิดเป็นปริมาณน้ำทิ้งที่เข้าระบบเท่ากับ 15.50 PV, 12.40 PV และ 9.30 PV ตามลำดับ

6. การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficient)

สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 12

$$t = \frac{N_o}{C_o v} \left[D - \frac{v}{K N_o} \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \right]$$

การประยุกต์ใช้สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams จำเป็นต้องอาศัยผลการทดลองจากหอดูดซับทดลอง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการได้แก่ ความสามารถในการดูดซับของชั้นสารดูดซับ (N_o) ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) และความลึกวิกฤติ (D_o) ดังสมการที่ 13

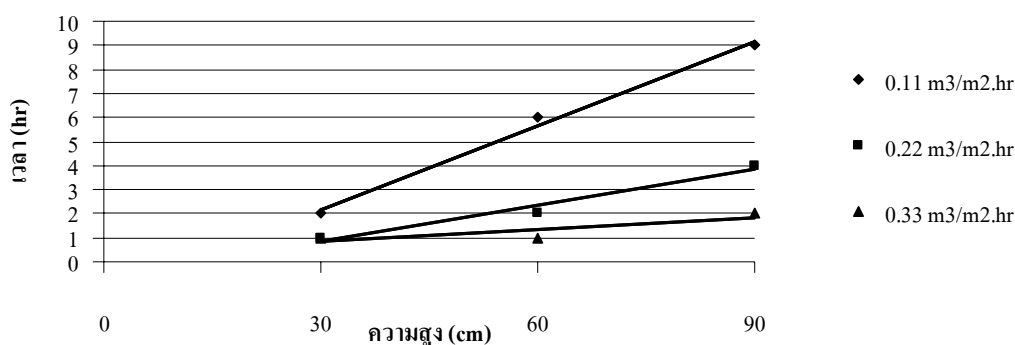
$$\begin{aligned} N_o &= \text{Slope. } C_o \cdot v \\ K &= \left(\frac{-1}{\text{Intercept. } C_o} \right) \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \\ D_o &= \left(\frac{v}{K \cdot N} \right) \ln \left(\frac{C_o}{C_B} - 1 \right) \end{aligned}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์พิจารณาที่จุดเบรกทรู 90 % ของถ่านกัมมันต์ และที่จุดเบรกทรู 70% ของเปลือกไข่ไก่ เนื่องจากสมการของ Bohart-Adams ต้องการหาค่า K และ N_o ซึ่งเป็นค่าคงที่ของแต่ละอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบจริง โดยในระบบจริงสามารถกำหนดค่า C/C_o ที่เหมาะสมได้ขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท ซึ่งถ้าที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเท่ากันและกำหนดค่า C/C_o เท่าไรค่า K และ N_o จะมีค่าเท่ากัน และพิจารณาเพียงค่าที่โอชีเท่านั้น

6.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดที่โอชีของถ่านกัมมันต์

การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดที่โอชีจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1437.5 mg/l และความเข้มข้นที่จุดเบรกทรู 90% เท่ากับ 143.75 mg/l จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้น

ถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 44 และสรุปค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดทีโอซีได้ดังตารางที่ 10



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์

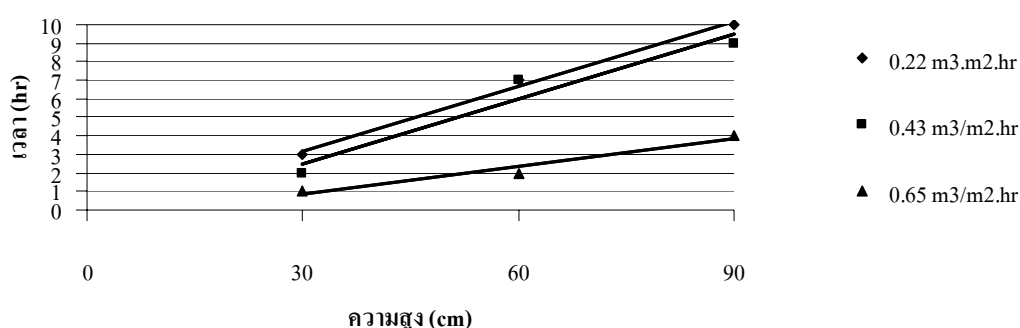
ตารางที่ 10 ค่า Slope, y-intercept และสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการการกำจัดทีโอซีของถ่านกัมมันต์

อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$)	Slope (hr/cm)	y-intercept (hr)	N_0 (kg/m^3)	K [$\text{m}^3/(\text{kg}.\text{hr})$]	D_0 (m)
0.11	0.1167	- 1.3333	1.6776	0.6550	0.114
0.22	0.0500	- 0.6667	1.4375	2.2923	0.133
0.33	0.0167	- 0.3333	0.7200	4.5859	0.200

จากผลการทดลองและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ คือ ความสามารถในการดูดซับของชั้นสารดูดซับ (N_0) ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) และความลึกวิกฤต (D_0) ของการกำจัดทีโอซีเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า N_0 มีแนวโน้มลดลง เพราะที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรต่ำมีเวลาที่ถ่านกัมมันต์จะสัมผัสมากกว่าที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร อนุภาคในน้ำเสียมีโอกาสแทรกซึมเข้าภายในชั้นถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่า ส่วนค่า K และ D_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดที่โอซีของเปลือกไข่ไก่

การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดที่โอซีจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1218.5 mg/l และความเข้มข้นที่จุดเบรคทู 70 % เท่ากับ 365.55 mg/l จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่แสดงดังภาพที่ 45 และสรุปค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการกำจัดที่โอซีได้ดังตารางที่ 11



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับและความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่

ตารางที่ 11 ค่า Slope, y-intercept และสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการการกำจัดที่โอซีของเปลือกไข่ไก่

อัตราน้ำสิ้นเชิงปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	Slope (hr/cm)	y-intercept (hr)	N_0 (kg/m ³)	K [m ³ /(kg.hr)]	D_0 (m)
0.22	0.1167	- 0.3333	1.4220	2.0863	0.029
0.43	0.1167	- 1.0000	2.8440	0.6954	0.086
0.65	0.0500	+ 0.6667	1.8278	-1.0430	0.087

จากผลการทดลองและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ คือ ความสามารถในการดูดซับของชั้นสารดูดซับ (N_0) ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) และความลึกวิกฤต (D_0) ของการกำจัดที่โอซี พบว่าที่อัตราน้ำสิ้นเชิงปริมาตร 0.65 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ค่า K มีค่าติดลบ วิไลพร (2536) อ้างถึง Eckenfelder (1966) ว่าจากการทดลองที่ค่า K มีค่าติดลบเนื่องจาก

ขีดจำกัดอุปกรณ์ในการทดลอง กล่าวคือความสูงของชั้นคอลัมน์สูงน้อยเกินไป ซึ่งการแก้ไขคือในการทดลองครั้งต่อไปทำการเพิ่มความสูงของชั้นเปลือกไข่ไก่ให้มากกว่า 90 ซม.

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของสารดูดซับ

พบว่าเปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากที่สุดเท่ากับ 52 % และ 28 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 48 %

2. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารดูดซับ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพบว่าไอโซเทอมมีแนวโน้มไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช ค่า k ของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่ และเยื่อกระดาษมีค่าเท่ากับ 0.6380 1.1669 0.5812 ตามลำดับและค่า $1/n$ ของถ่านกัมมันต์ เปลือกไข่ไก่ และเยื่อกระดาษมีค่าเท่ากับ 2.0713 5.8834 1.8534 ตามลำดับ และสัดส่วน COD:TOC ของน้ำเสียหลังจากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และเปลือกไข่ไก่ลดลง

3. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้หอดูดซับทดลอง

เมื่อพิจารณาที่สูงของชั้นสารดูดซับต่าง ๆ กันคือ 30, 60 และ 90 ซม. พบว่าที่สูงของชั้นสารดูดซับมากที่สุดคือ 90 ซม. มีความสามารถในการกำจัดสี ทีโอซีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด และความสามารถในการกำจัดสี ทีโอซีและของแข็งแขวนลอยลดต่ำลงเมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับลดลง

เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ 0.11, 0.22 และ 0.33 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ และที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ 0.22, 0.43 และ 0.65 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ ที่ความสูงของชั้นสารดูดซับเท่ากัน พบว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรน้อยที่สุดคือ 0.11 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ และ 0.22 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ มี

ความสามารถในการกำจัดสี ที่โอซีและของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด และความสามารถในการกำจัดสี ที่โอซีและของแข็งแขวนลอยลดต่ำลงเมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ที่โอซีและของแข็งแขวนลอยจะสูงที่สุด เมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับ มากที่สุดคือ 90 ซม. และอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรน้อยที่สุดของชั้นถ่านกัมมันต์และเปลือกไข่ไก่คือ $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ และ $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง PV และอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่แตกต่างกันของ ชั้นสารดูดซับที่ 90 ซม. พบว่าเมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่น้อยลง สารถูกดูดซับมีเวลาสัมผัสกับ สารดูดซับได้มากขึ้น จึงมีโอกาสถูกดูดซับได้มากกว่า เวลาที่จุดเบรททรู้อย่างตามอัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตรที่เพิ่มขึ้น อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่เท่ากับ 0.11, 0.22 และ $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ 90 ซม. พบว่าปริมาณน้ำที่เข้าระบบที่เท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดเบรททรูคิดเป็นปริมาณ น้ำทิ้งที่เข้าระบบเท่ากับ 3.69 PV, 3.28 PV และ 1.22 PV ตามลำดับ ส่วนที่ความสูงของชั้นเปลือก ไข่ไก่ 90 ซม. อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรที่ 0.22, 0.43 และ $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ปริมาณน้ำที่เข้าระบบที่ เท่ากับความเข้มข้นของทีโอซีที่จุดเบรททรูคิดเป็นปริมาณน้ำทิ้งที่เข้าระบบเท่ากับ 15.50 PV, 12.40 PV และ 9.30 PV ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เป็นค่าคงที่ในแต่ละอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร เมื่อค่าอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย พบว่าที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร เท่ากับ 0.11, 0.22 และ $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นที่จุดเบรททรู 90% มีค่า $N_0 (\text{kg}/\text{m}^3)$, $K [\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{hr})]$, $D_0 (\text{m})$ เท่ากับ 1.8653, 0.6550, 0.114 ; 1.5813, 2.2923, 0.133 ; 0.7922, 4.5859, 0.200 ตามลำดับ และที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.22, 0.43 และ $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของชั้นเปลือก ไข่ไก่ที่ความเข้มข้นที่จุดเบรททรูเท่ากับ 70% มีค่า $N_0 (\text{kg}/\text{m}^3)$, $K [\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{hr})]$, $D_0 (\text{m})$ เท่ากับ 2.9862, 2.0863, 0.029 ; 6.1146, 0.6954, 0.086 ; 3.9601, 1.0430, 0.133 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ในการนำไปใช้ในการออกแบบระบบจริง ใช้ค่าคงที่ต่างๆ ที่คำนวณได้จากการศึกษานี้ได้แต่ให้พิจารณาความเข้มข้นที่จุดเบรกก้าวที่เหมาะสมตามลักษณะสมบัติของน้ำเสียและคุณสมบัติน้ำทิ้งที่ต้องการ
2. การนำไปใช้ในการออกแบบระบบจริง ควรทำการศึกษาถึงการสูญเสียเฮดจากคอลัมน์เพื่อเป็นการศึกษาต้นทุนการก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบ
3. การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ได้
4. จากการทดลองสามารถนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นได้ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์และพิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. 2544. **ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 1**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. **การบำบัดน้ำเสีย**. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

จรรยา คงฤทธิ์. 2546. **การจัดโลหะหนัก ฟีนอลและสีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยวิธีแลกเปลี่ยน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2522. **หลักเคมี 1**. กราฟิการ์ต, กรุงเทพฯ.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. 2550. **การวิเคราะห์ค่าซีโอดี**. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. แหล่งที่มา: www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/A15-COD-w.pdf, 4 กันยายน 2550.

มันสิน ตันจุลเวศน์. 2539. **วิศวกรรมประปา เล่ม 2**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

วิวรรณ ขจรเกียรติกุล. 2539. **การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วิไลพร วณิชชัวโรดม. 2536. **การบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยขบวนการดูดซับด้วยแอคทีเวตเต็ดคาร์บอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. 2545. โครงการสำรวจพฤติกรรมทางการตลาด
เพื่อสนับสนุนระบบการแข่งขันตามโครงการส่งเสริมระบบการแข่งขันทางการค้า
ที่เกื้อหนุนต่อการส่งออก. แหล่งที่มา: http://www.tdri.or.th/reports/unpublished/survey/c_10.pdf, 16 กรกฎาคม 2550.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2544. อาหารและผลิตภัณฑ์
ธรรมชาติ. แหล่งที่มา: <http://www.tistr-foodprocess.net/Coffee.htm#m5>, 10
ตุลาคม 2549.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ถ่านกัมมันต์. มอก. 900-2532.

สุจินต์ เอี่ยมปี, พ.อ. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับ
ด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เสรีย์ ตู๊ประกาย. 2548. การบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในสารละลายโดยไททาเนียมได
ออกไซด์แบบตรึงในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน. 2548. บทบาทของ TOC ในงานวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม. เอกสารความปลอดภัย. แหล่งที่มา: <http://she.cpportal.net/Default.aspx?tabid=1022>, 4 กันยายน 2550.

Akbal, F. 2005. Adsorption of basic dyes from aqueous solution onto pumice powder.
Journal of Colloid and Interface Science (286): 455 – 458.

Andriot, I., J.L. Quere and E. Guichard. 2004. Interactions between coffee melanoidins
and flavour compounds: impact of freeze – drying (method and time) and
roasting degree of coffee on melanoidins retention capacity. **Food Chemistry**.
(85): 289 – 294.

- Annadurai, G., R.S. Juang and D.J. Lee. 2002. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials.** (92): 263 – 274.
- APHA.AWWA.WEF. 1995. **Standard Methods for the Examination of water and wastewater.** 19th ed. Washington DC, American public Health Ass.
- Calace, N., E.Nardi, B.M., Petronio, M.i. Pietrolett and G.Tosti. 2003. Metal ion removal from water by sorption on paper mill sludge. **Chemosphere.** (51): 797 – 803.
- Cheremisinoff, P.N. and A.C. Morresi. 1987. Carbon adsorption applications. *In* P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch, eds. **Carbon adsorption handbook.** Ann Arbor Science, Michigan.
- Clerk, R.M. and B.W. Lykins. Jr. 1989. Granular Activated Carbon. **Design Operation and Cost.** Lewis Pub, Michigan. p.342
- Devi, R., V. Singh and A. Kumar. 2007. COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacago peel carbon. **Bioresource Technology.**
- Eckenfelder, W.W. 1989. **Water Resources and Environmental Engineering.** 2nd ed. Mc Graw – Hill, Inc., New York.
- Eckenfelder, W.W. 2000. **Industrial water pollution control.** 3rd ed. Mc Graw – Hill, Inc., Singapore.
- EI – Geund, M.S. 1991. Color removal from textle effluents by adsorption techniques. **Water Resource.** (25): 271 – 273.

- Faust, S.D. and Aly, O.M. 1987. **Adsorption process for water treatment**. Butterworth Publ, Boston, p.509
- Frederick, W.P. 1990. **Water Quality and Treatment**. 4th ed. Mc Graw – Hill, Inc., New York.
- Furuya, E.G., H.T. Chang, Y. Miura and K.E. Noll. 1997. A fundamental analysis of the isotherm for the adsorption of phenolic compounds on activated carbon. **Separation and Purification Technology**. (11): 69 – 78.
- Gernjak, W., T. Krutzler, A. Glaser, M. Malato, J. Caceres, R. Baucer and A.R. Alba. 2003. Photo – Fenton treatment of water containing natural phenolic pollutants. **Chemosphere**. (50): 71-78.
- Ghorai, S. and K.K. Pant. 2004. Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina. **Separation and Purification Technology**.
- Hamdaoui, O. 2006. Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed columns. **Journal of Hazardous Materials**. (138): 293 – 303.
- Low, K.S. and C.K. Lee. 1997. Quaterized rice husk as sorbate for reactive dyes. **Bioresource Technology**. (61): 121 – 125.
- Mayer, D. 1999. **Surface, interface and colloids**. Principle and application 2nd ed. John Wiley&Sons, Inc., New York.
- Mckey, G., G. Ramprasad and P. Mowli. 1987. Desorption and regeneration of dye colors from low – cost materials. **Water Resource**. (21): 375-377.

- Mendoza, R.B. and M.F. Castillo-Rivera. 1988. Start-up of an Anaerobic Hybrid (UASB/Filter) Reactor Treating Wastewater from a Coffee Processing Plant. **Environmental Microbiology**. (4): 219-225.
- Miheleic, J.R. 1999. **Fundamentals of Environmental Engineering**. John Wiley & Sons inc. New York. U.S.A. p.375
- Naczki, M. and F. Shahidi. 2004. Extraction and analysis of phenolics in food. **Journal of chromatography A**. (1054): 95 – 111.
- Nicholas, P.C. and N.C. Paul. 1993. **Water Treatment and Waste Recovery Advanced Technology and Applications**. PTR Presstice Hall, Englewood Cliffs.
- Richard, J.W. 1994. **Hazardous wastes**. Hamilton Printing, New York.
- Santhy, K. and P. Selvathy. 2005. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. **Bioresource Technology**.
- Tokumura, M., A. Ohta, H. T. Znad and Y. Kawase. 2006. UV light assisted decolorization of dark brown colored coffee effluent by photo-Fenton reaction. **Water Research**. (40): 3775 – 3784.
- Tsai, W.T., K.J Hsien, H.C. Hsu, C.M. Lin, K.Y. Lin and C.H. Chiu. 2007. Utilization of ground eggshell waste as an adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. **Bioresource Technology**.

Tseng, R.L., S.K. Tseng and F.C. Wu. 2006. Preparation of high surface area carbons from Corncob with KOH etching plus CO₂ gasification for the adsorption of dyes and phenol from water. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าที่โอซีของถ่านกัมมันต์, เปลือกไข่ไก่และเยื่อกระดาษที่ปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าที่โอซีของถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

สารดูดซับ	ปริมาณ (g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
ถ่านกัมมันต์	5	5	595.80	591.00	593.40
	5	10	631.10	628.00	629.55
	5	20	604.10	607.70	605.90
	5	30	469.00	462.50	465.75
	5	40	495.90	489.30	492.60
	5	50	341.40	339.80	340.60
	5	60	516.00	507.00	511.50
	5	80	439.40	432.50	435.95
	5	100	395.00	386.20	390.60
	5	120	413.60	409.20	411.40
ถ่านกัมมันต์	10	5	325.20	323.80	324.50
	10	10	349.80	352.10	350.95
	10	20	360.70	359.80	360.25
	10	30	488.70	472.40	480.55
	10	40	322.60	331.50	327.05
	10	50	302.50	303.70	303.10
	10	60	359.50	348.90	354.20
	10	80	469.60	466.50	468.05
	10	100	309.90	308.70	309.30
	10	120	231.20	229.40	230.30
ถ่านกัมมันต์	15	5	371.20	368.50	369.85
	15	10	340.30	335.80	338.05
	15	20	347.50	342.30	344.90
	15	30	276.20	283.40	279.80
	15	40	306.30	302.60	304.45

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สารดูดซับ	ปริมาณ (g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	15	50	339.30	336.70	338.00
	15	60	306.10	321.00	313.55
	15	80	223.40	243.00	233.20
	15	100	351.80	349.30	350.55
	15	120	469.60	438.90	454.25
ถ่านกัมมันต์	20	5	336.50	329.40	332.95
	20	10	298.00	287.00	292.50
	20	20	337.80	323.00	330.40
	20	30	321.40	336.30	328.85
	20	40	322.60	342.20	332.40
	20	50	320.70	326.2	323.45
	20	60	207.10	259.00	233.05
	20	80	262.80	212.40	237.60
	20	100	257.00	209.00	233.00
	20	120	107.80	108.00	107.90

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าทีโอซีของเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

สารดูดซับ	ปริมาณ(g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
เปลือกไข่ไก่	5	5	409.60	412.30	410.95
	5	10	503.50	507.00	505.25
	5	20	602.20	545.20	573.70
	5	30	533.40	598.70	566.05
	5	40	429.20	431.60	430.40
	5	50	632.20	545.60	588.90
	5	60	475.90	523.00	499.45
	5	80	492.50	501.50	497.00
	5	100	455.40	489.70	472.55
	5	120	526.20	512.60	519.40
เปลือกไข่ไก่	10	5	469.60	453.50	461.55
	10	10	442.00	448.70	445.35
	10	20	432.00	440.00	436.00
	10	30	446.30	443.50	444.90
	10	40	495.50	486.40	490.95
	10	50	432.80	452.50	442.65
	10	60	370.50	397.20	383.85
	10	80	413.70	400.30	407.00
	10	100	398.30	402.10	400.20
	10	120	438.30	395.60	416.95
เปลือกไข่ไก่	15	5	356.80	384.30	370.55
	15	10	452.90	440.80	446.85
	15	20	457.50	439.00	448.25
	15	30	519.00	456.20	487.60
	15	40	447.70	479.00	463.35

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สารดูดซับ	ปริมาณ(g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	15	50	373.90	428.90	401.40
	15	60	472.00	419.40	445.70
	15	80	384.20	415.60	399.90
	15	100	390.30	409.20	399.75
	15	120	439.50	406.40	422.95
เปลือกไข่ไก่	20	5	381.00	376.00	378.50
	20	10	457.70	384.30	421.00
	20	20	372.40	438.5	405.45
	20	30	442.30	442.10	442.20
	20	40	429.80	445.00	437.40
	20	50	442.10	433.70	437.90
	20	60	412.50	429.00	420.75
	20	80	426.70	409.80	418.25
	20	100	406.20	413.40	409.80
	20	120	360.00	411.60	385.80

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าที่โอซีของเยื่อกระดาษที่ปริมาณและเวลาต่าง ๆ กัน

สารดูดซับ	ปริมาณ(g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
เยื่อกระดาษ	5	5	564.60	556.70	560.65
	5	10	572.90	562.50	567.70
	5	20	488.50	553.40	520.95
	5	30	521.50	520.00	520.75
	5	40	571.10	508.90	540.00
	5	50	498.80	496.50	497.65
	5	60	458.70	495.00	476.85
	5	80	511.00	532.10	521.55
	5	100	545.40	540.00	542.70
	5	120	344.00	409.80	376.90
เยื่อกระดาษ	10	5	397.10	452.00	424.55
	10	10	430.00	436.70	433.35
	10	20	392.00	393.60	392.80
	10	30	441.90	390.00	415.95
	10	40	338.00	385.30	361.65
	10	50	382.90	347.60	365.25
	10	60	298.40	287.00	292.70
	10	80	293.80	268.80	281.30
	10	100	353.80	349.00	351.40
	10	120	348.80	352.10	350.45
เยื่อกระดาษ	15	5	344.20	448.70	396.45
	15	10	464.20	386.50	425.35
	15	20	347.90	370.90	359.40
	15	30	352.70	353.00	352.85
	15	40	283.00	346.10	314.55

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

สารดูดซับ	ปริมาณ(g)	เวลา(min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	15	50	318.00	338.70	328.35
	15	60	309.10	315.00	312.05
	15	80	301.60	312.30	306.95
	15	100	276.30	277.90	277.10
	15	120	229.20	255.60	242.40
เยื่อกระดาษ	20	5	279.30	302.30	290.80
	20	10	248.70	289.40	269.05
	20	20	279.30	269.00	274.15
	20	30	195.70	250.20	222.95
	20	40	271.10	279.80	275.45
	20	50	276.60	273.40	275.00
	20	60	292.30	281.00	286.65
	20	80	274.80	272.60	273.70
	20	100	204.70	258.00	231.35
	20	120	244.40	245.70	245.05

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับครั้งที่ 1

สารดูดซับ	m (g)	C_e (mg/l)	x (mg)	x/m (mg/g)	log (x/m)	log C_e
ถ่านกัมมันต์	5	490.30	82.470	16.4940	1.2173	2.6905
	10	351.97	96.303	9.6303	0.9836	2.5465
	15	333.17	98.183	6.5455	0.8159	2.5227
	20	277.17	103.873	5.1937	0.7155	2.4427
เปลือกไข่ไก่	5	506.65	80.835	16.1670	1.2086	2.7047
	10	433.90	88.110	8.8110	0.9450	2.6374
	15	429.38	88.562	5.9041	0.7712	2.6328
	20	413.07	90.193	4.5097	0.6541	2.6160
เยื่อกระดาษ	5	507.65	80.735	16.1470	1.2081	2.7056
	10	365.62	94.938	9.4938	0.9774	2.5630
	15	322.62	99.238	6.6159	0.8206	2.5087
	20	276.69	103.831	5.1916	0.7153	2.4420

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ ครั้งที่ 2

สารดูดซับ	m (g)	C _e (mg/l)	x (mg)	x/m (mg/g)	log (x/m)	log C _e
ถ่านกัมมันต์	5	485.32	82.968	16.5936	1.2199	2.6860
	10	349.68	96.532	9.6532	0.9847	2.5437
	15	332.15	98.285	6.5523	0.8164	2.5213
	20	273.25	104.175	5.2088	0.7167	2.4366
เปลือกไข่ไก่	5	506.72	80.828	16.1656	1.2086	2.7048
	10	431.98	88.302	8.8302	0.9460	2.6355
	15	427.88	88.712	5.9141	0.7719	2.6313
	20	418.34	89.666	4.4833	0.6516	2.6215
เชือกกระดาษ	5	517.49	79.751	15.9502	1.2028	2.7139
	10	366.21	94.879	9.4879	0.9772	2.5637
	15	340.47	97.453	6.4969	0.8127	2.5321
	20	272.14	104.286	5.2143	0.7172	2.4348

ภาคผนวก ค

ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำสิ้นเชิงปริมาตรต่าง ๆ



(1)



(2)

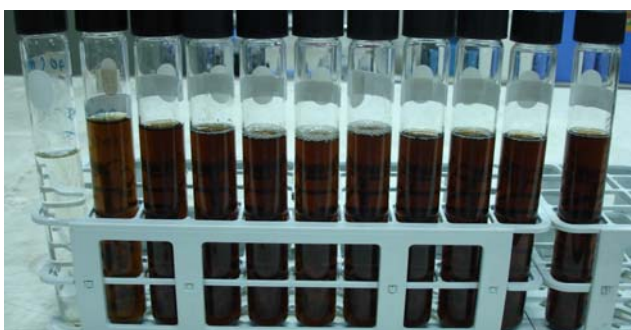


(3)

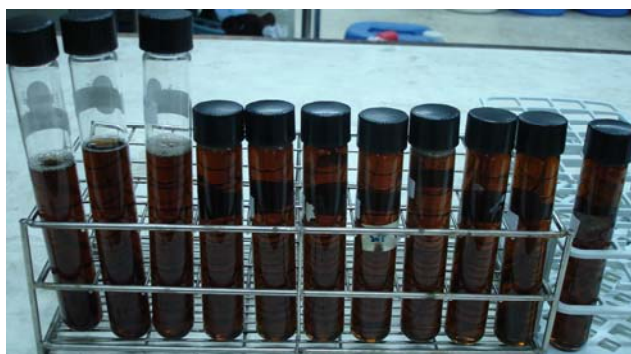
ภาพผนวกที่ ค1 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



(1)



(2)



(3)

ภาพผนวกที่ ค2 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำสิ้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



(1)

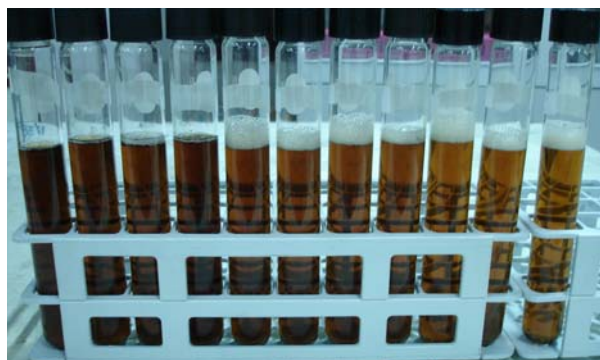


(2)

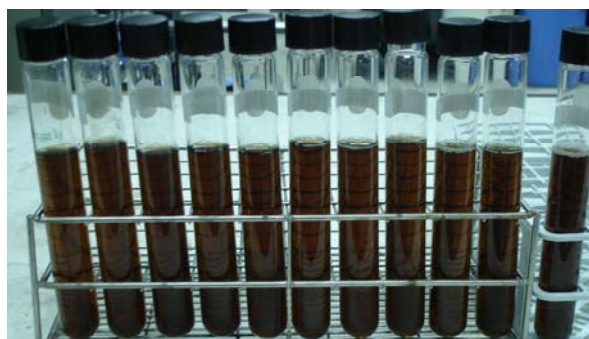


(3)

ภาพผนวกที่ ค3 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น ถ่านกัมมันต์ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



(1)



(2)

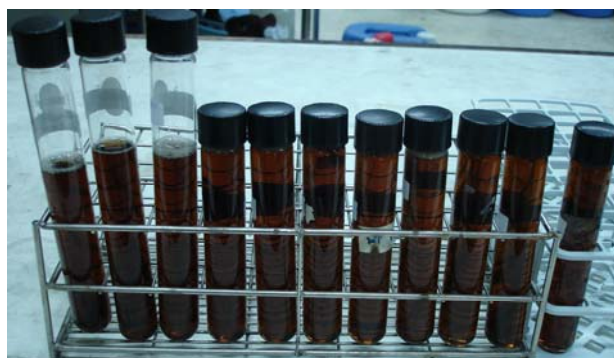


(3)

ภาพผนวกที่ ค4 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น
เปลือกไข่ไก่ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



(1)



(2)

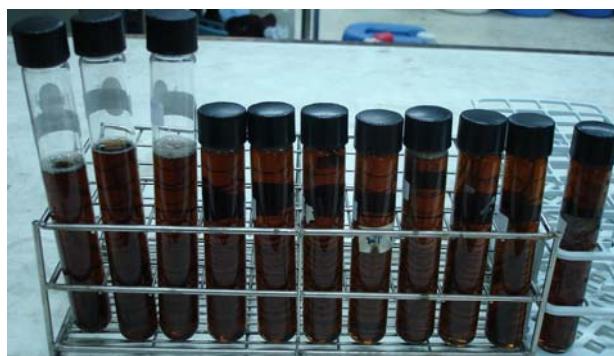


(3)

ภาพผนวกที่ ค5 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น
เปลือกไข่ไก่ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ



(1)



(2)



(3)

ภาพผนวกที่ ค6 ลักษณะของน้ำเสียที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ที่ความสูงของชั้น
เปลือกไข่ไก่ (1) 90 ซม. (2) 60 ซม. (3) 30 ซม. ที่เวลา 0 - 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาคผนวก ง

ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำสิ้นเชิงปริมาตรต่าง ๆ

ตารางผนวกที่ ๑ ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.11	0	30	7.92	2.000	360.00	48
0.11	0	60	8.36	0.018	268.90	28
0.11	0	90	8.43	0.007	10.00	6
0.11	1	30	7.70	2.200	131.50	92
0.11	1	60	8.26	0.037	70.90	30
0.11	1	90	8.32	0.009	4.15	6
0.11	2	30	7.69	2.300	100.20	96
0.11	2	60	8.21	0.142	49.00	30
0.11	2	90	8.30	0.009	7.20	20
0.11	3	30	7.65	2.400	134.70	96
0.11	3	60	8.15	0.479	55.20	30
0.11	3	90	8.28	0.04	19.40	22
0.11	4	30	7.42	2.450	242.80	102
0.11	4	60	8.06	1.012	60.90	36
0.11	4	90	8.26	0.049	23.90	22
0.11	5	30	7.39	2.500	355.10	118
0.11	5	60	8.03	1.429	104.50	42
0.11	5	90	8.27	0.054	35.90	24
0.11	6	30	7.33	2.600	302.70	122
0.11	6	60	7.85	2.058	145.60	54
0.11	6	90	8.21	0.189	43.00	26
0.11	7	30	7.26	2.639	327.50	126
0.11	7	60	7.78	2.213	237.20	58

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.11	7	90	8.24	0.490	65.90	28
0.11	8	30	7.17	2.650	420.10	138
0.11	8	60	7.62	2.370	241.90	64
0.11	8	90	8.08	1.383	102.30	36
0.11	9	30	7.12	2.700	475.90	192
0.11	9	60	7.56	2.417	328.20	76
0.11	9	90	7.90	1.638	108.50	38
0.11	10	30	7.05	2.850	565.60	222
0.11	10	60	7.50	2.429	429.50	92
0.11	10	90	7.90	2.218	176.20	46

ตารางผนวกที่ ง2 ที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.11	0	30	8.06	2.200	430.50	78
0.11	0	60	8.68	0.076	344.90	42
0.11	0	90	8.57	0.026	10.50	16
0.11	1	30	8.11	2.300	157.10	96
0.11	1	60	8.64	0.050	73.12	50
0.11	1	90	8.59	0.032	9.10	18
0.11	2	30	8.09	2.600	155.20	98
0.11	2	60	8.65	0.742	65.90	54
0.11	2	90	8.63	0.048	7.80	12
0.11	3	30	8.00	2.600	173.60	122
0.11	3	60	8.64	0.958	97.00	56
0.11	3	90	8.67	0.061	22.70	18
0.11	4	30	7.97	2.650	280.40	124
0.11	4	60	8.61	1.346	106.10	66
0.11	4	90	8.72	0.070	27.90	24
0.11	5	30	7.97	2.700	297.40	136
0.11	5	60	8.52	2.200	135.60	68
0.11	5	90	8.75	0.133	38.10	30
0.11	6	30	7.95	2.800	309.10	148
0.11	6	60	8.64	2.400	139.10	74
0.11	6	90	8.80	0.552	69.90	32
0.11	7	30	7.93	2.800	339.80	158
0.11	7	60	8.62	2.597	255.40	74

ตารางผนวกที่ ๑2 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.11	7	90	8.82	0.631	140.10	34
0.11	8	30	7.89	2.850	346.70	166
0.11	8	60	8.62	2.679	264.10	84
0.11	8	90	8.83	1.267	153.30	34
0.11	9	30	7.87	2.850	347.10	196
0.11	9	60	8.59	2.700	285.40	86
0.11	9	90	8.83	1.643	172.60	44
0.11	10	30	7.93	2.850	381.50	226
0.11	10	60	8.67	2.700	305.00	94
0.11	10	90	8.83	1.690	187.00	60

ตารางผนวกที่ ง3 ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	0	30	7.60	2.327	443.60	48
0.22	0	60	8.25	0.230	73.00	22
0.22	0	90	8.37	0.006	33.40	10
0.22	1	30	7.58	2.337	131.60	70
0.22	1	60	7.97	1.184	131.60	22
0.22	1	90	8.31	0.012	7.90	10
0.22	2	30	7.64	2.347	270.70	74
0.22	2	60	7.87	1.383	184.40	32
0.22	2	90	8.23	0.037	11.60	12
0.22	3	30	7.38	2.381	303.40	92
0.22	3	60	7.83	1.231	198.50	42
0.22	3	90	8.19	0.646	111.90	14
0.22	4	30	7.43	1.861	356.10	116
0.22	4	60	7.87	1.233	253.60	56
0.22	4	90	8.31	0.710	138.00	14
0.22	5	30	7.34	2.018	357.00	120
0.22	5	60	7.78	2.204	273.60	60
0.22	5	90	8.16	0.910	155.70	20
0.22	6	30	7.38	2.258	380.70	120
0.22	6	60	7.78	2.236	261.10	70
0.22	6	90	8.12	0.990	170.80	28
0.22	7	30	7.31	2.302	380.70	148
0.22	7	60	7.72	2.244	325.70	72

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	7	90	8.04	1.266	175.80	32
0.22	8	30	7.45	2.368	410.70	188
0.22	8	60	7.78	2.348	329.20	76
0.22	8	90	8.09	1.644	209.60	42
0.22	9	30	7.20	2.428	440.00	194
0.22	9	60	7.63	2.270	348.60	94
0.22	9	90	7.97	1.920	228.70	44
0.22	10	30	7.03	2.442	441.70	242
0.22	10	60	7.53	2.279	354.00	104
0.22	10	90	7.96	2.052	316.40	62

ตารางผนวกที่ ๔4 ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	0	30	7.82	2.250	359.50	48
0.22	0	60	8.25	0.225	46.20	34
0.22	0	90	8.33	0.035	40.40	6
0.22	1	30	7.78	2.025	386.90	82
0.22	1	60	8.13	1.150	183.60	54
0.22	1	90	8.37	0.036	5.30	8
0.22	2	30	7.63	2.400	409.30	92
0.22	2	60	8.08	1.510	228.80	56
0.22	2	90	8.33	0.045	11.20	12
0.22	3	30	7.68	2.500	416.50	106
0.22	3	60	8.11	1.489	244.00	70
0.22	3	90	8.22	0.787	147.40	14
0.22	4	30	7.64	2.381	430.20	106
0.22	4	60	8.02	1.911	257.30	74
0.22	4	90	8.22	0.900	204.20	36
0.22	5	30	7.65	2.392	443.50	108
0.22	5	60	7.99	2.200	283.00	76
0.22	5	90	8.17	0.950	209.10	44
0.22	6	30	7.62	2.404	462.20	112
0.22	6	60	7.95	2.250	295.20	82
0.22	6	90	8.23	0.950	228.10	52
0.22	7	30	7.52	2.404	467.80	114
0.22	7	60	7.91	2.450	299.50	84

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	7	90	8.24	1.527	240.20	56
0.22	8	30	7.56	2.416	529.50	122
0.22	8	60	7.84	2.504	328.80	84
0.22	8	90	8.22	2.100	245.50	60
0.22	9	30	7.44	2.433	539.30	126
0.22	9	60	7.87	2.153	373.90	96
0.22	9	90	8.17	1.990	268.70	74
0.22	10	30	7.38	2.808	632.70	158
0.22	10	60	7.86	2.650	390.20	102
0.22	10	90	8.15	2.543	324.60	86

ตารางผนวกที่ ๕ ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.33	0	30	7.08	2.252	561.60	90
0.33	0	60	7.42	0.533	334.45	58
0.33	0	90	7.86	0.037	3.00	22
0.33	1	30	7.08	2.300	135.50	92
0.33	1	60	7.18	1.708	134.00	68
0.33	1	90	7.54	0.036	13.00	34
0.33	2	30	7.02	2.200	342.17	112
0.33	2	60	7.09	2.169	268.80	80
0.33	2	90	7.32	1.237	201.80	36
0.33	3	30	6.88	2.250	389.00	116
0.33	3	60	7.03	2.073	292.80	80
0.33	3	90	7.20	1.635	260.10	42
0.33	4	30	7.18	2.338	412.80	118
0.33	4	60	6.75	2.185	326.60	102
0.33	4	90	6.96	2.003	261.50	50
0.33	5	30	6.49	2.600	517.30	130
0.33	5	60	6.88	2.501	380.00	102
0.33	5	90	7.10	2.415	312.20	66
0.33	6	30	6.28	2.65	692.70	150
0.33	6	60	6.87	2.516	520.40	108
0.33	6	90	7.07	2.429	325.80	80
0.33	7	30	6.21	2.775	735.60	138
0.33	7	60	6.81	2.516	590.20	120

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.33	7	90	7.01	2.456	390.00	80
0.33	8	30	6.13	2.800	742.80	136
0.33	8	60	6.78	2.517	702.60	122
0.33	8	90	6.98	2.457	468.30	84
0.33	9	30	6.03	2.804	777.90	150
0.33	9	60	6.72	2.532	703.30	126
0.33	9	90	6.94	2.485	512.80	104
0.33	10	30	5.96	2.789	789.30	164
0.33	10	60	6.67	2.587	742.90	138
0.33	10	90	6.89	2.485	658.00	108

ตารางผนวกที่ ๖ ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.33	0	30	8.26	2.356	622.30	94
0.33	0	60	8.43	0.583	389.20	58
0.33	0	90	8.59	0.033	5.90	18
0.33	1	30	8.28	2.172	149.00	102
0.33	1	60	8.31	1.912	145.00	72
0.33	1	90	8.38	0.036	14.00	42
0.33	2	30	8.15	2.300	402.20	120
0.33	2	60	8.20	2.188	371.00	82
0.33	2	90	8.35	1.464	213.70	56
0.33	3	30	8.06	2.500	399.60	120
0.33	3	60	8.09	2.255	382.70	84
0.33	3	90	8.32	1.800	273.80	76
0.33	4	30	8.00	2.500	502.00	126
0.33	4	60	8.08	2.350	418.70	108
0.33	4	90	8.38	2.350	285.00	82
0.33	5	30	7.85	2.500	612.30	130
0.33	5	60	8.03	2.450	436.00	112
0.33	5	90	8.21	2.550	361.60	94
0.33	6	30	7.78	2.515	776.60	140
0.33	6	60	7.97	2.590	652.30	116
0.33	6	90	8.11	2.616	367.20	96
0.33	7	30	7.54	2.599	828.80	142
0.33	7	60	7.89	2.607	654.50	120

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.33	7	90	7.97	2.637	458.90	100
0.33	8	30	7.47	2.755	835.90	144
0.33	8	60	7.83	2.618	708.30	126
0.33	8	90	7.94	2.735	617.40	104
0.33	9	30	7.38	2.896	853.90	172
0.33	9	60	7.73	2.824	715.20	132
0.33	9	90	7.91	2.794	616.30	114
0.33	10	30	7.12	2.895	855.20	184
0.33	10	60	7.69	2.726	793.80	138
0.33	10	90	7.84	2.637	626.80	120

ตารางผนวกที่ 7 ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	0	30	7.04	1.492	306.50	102
0.22	0	60	7.32	1.087	173.50	88
0.22	0	90	7.68	0.950	168.00	80
0.22	1	30	6.97	1.702	326.00	116
0.22	1	60	7.22	1.089	253.00	94
0.22	1	90	7.27	0.620	177.45	80
0.22	2	30	6.96	1.622	336.50	130
0.22	2	60	7.17	1.226	254.50	106
0.22	2	90	7.54	0.922	234.90	82
0.22	3	30	6.95	1.652	340.50	136
0.22	3	60	7.07	1.275	259.00	106
0.22	3	90	7.52	0.945	238.20	86
0.22	4	30	6.95	1.632	341.50	144
0.22	4	60	7.01	1.289	306.50	116
0.22	4	90	7.44	1.172	245.85	90
0.22	5	30	6.92	1.646	385.00	148
0.22	5	60	6.98	1.293	340.50	124
0.22	5	90	7.38	1.073	249.00	102
0.22	6	30	6.82	1.805	390.00	156
0.22	6	60	6.93	1.291	341.50	126
0.22	6	90	7.33	1.087	250.50	104
0.22	7	30	6.73	1.922	426.00	156
0.22	7	60	6.88	1.301	358.50	128

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	7	90	7.28	1.237	264.00	118
0.22	8	30	6.73	1.922	471.00	158
0.22	8	60	6.84	1.321	365.00	130
0.22	8	90	7.14	1.272	316.00	118
0.22	9	30	6.69	2.129	487.00	158
0.22	9	60	6.84	1.320	362.00	154
0.22	9	90	7.12	1.288	334.00	120
0.22	10	30	6.69	2.264	527.00	198
0.22	10	60	6.88	1.488	364.00	156
0.22	10	90	7.11	1.345	366.50	130

ตารางผนวกที่ 8 ที่อัตราน้ำดันเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2

อัตราน้ำดันเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	0	30	6.92	1.467	326.80	104
0.22	0	60	7.37	1.062	178.60	96
0.22	0	90	7.89	0.890	151.50	78
0.22	1	30	6.85	1.500	336.45	108
0.22	1	60	7.36	1.091	265.45	102
0.22	1	90	7.82	0.894	196.30	90
0.22	2	30	6.80	1.559	338.75	128
0.22	2	60	7.16	1.112	277.90	114
0.22	2	90	7.58	0.916	224.65	94
0.22	3	30	6.78	1.582	368.70	128
0.22	3	60	7.10	1.141	284.75	114
0.22	3	90	7.53	0.934	244.08	96
0.22	4	30	6.74	1.657	375.50	132
0.22	4	60	6.96	1.211	309.40	118
0.22	4	90	7.36	1.018	233.60	98
0.22	5	30	6.73	1.684	397.95	144
0.22	5	60	6.91	1.255	321.05	122
0.22	5	90	7.34	1.020	237.40	104
0.22	6	30	6.71	1.824	404.75	150
0.22	6	60	6.96	1.278	323.95	130
0.22	6	90	7.27	1.135	259.60	106
0.22	7	30	6.71	1.942	433.60	160
0.22	7	60	6.85	1.282	382.50	136

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.22	7	90	7.24	1.151	286.40	116
0.22	8	30	6.69	1.954	435.75	162
0.22	8	60	6.82	1.332	396.90	148
0.22	8	90	7.14	1.152	318.55	122
0.22	9	30	6.68	2.017	497.80	164
0.22	9	60	6.83	1.393	405.50	150
0.22	9	90	7.12	1.212	348.90	126
0.22	10	30	6.68	2.090	552.50	168
0.22	10	60	6.80	1.419	362.35	156
0.22	10	90	7.04	1.328	400.68	130

ตารางผนวกที่ ๑๑ ที่อัตราการล้นผิวเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.43	0	30	6.93	1.761	322.80	104
0.43	0	60	7.43	1.230	259.40	100
0.43	0	90	7.73	0.860	185.75	96
0.43	1	30	6.91	1.821	339.75	130
0.43	1	60	7.20	1.384	262.90	114
0.43	1	90	7.71	1.073	204.35	98
0.43	2	30	6.88	1.832	348.95	130
0.43	2	60	6.96	1.321	264.35	114
0.43	2	90	7.47	1.240	235.40	98
0.43	3	30	6.86	1.852	380.50	138
0.43	3	60	6.96	1.433	264.50	126
0.43	3	90	7.36	1.366	253.70	98
0.43	4	30	6.84	2.127	391.35	152
0.43	4	60	6.92	1.483	272.50	132
0.43	4	90	7.48	1.771	270.30	100
0.43	5	30	6.82	2.237	400.50	154
0.43	5	60	6.90	1.604	315.45	134
0.43	5	90	7.07	1.191	282.85	108
0.43	6	30	6.80	2.247	411.50	158
0.43	6	60	6.89	1.632	317.50	138
0.43	6	90	6.98	1.299	282.95	116
0.43	7	30	6.79	2.268	436.50	162
0.43	7	60	6.84	1.744	327.85	142

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.43	7	90	6.95	1.366	283.20	118
0.43	8	30	6.75	2.381	462.00	168
0.43	8	60	6.79	1.827	374.40	146
0.43	8	90	6.90	1.544	285.80	126
0.43	9	30	6.72	2.382	544.00	176
0.43	9	60	6.76	1.892	412.15	152
0.43	9	90	6.90	1.552	296.05	142
0.43	10	30	6.62	2.442	578.00	184
0.43	10	60	6.82	1.943	493.65	170
0.43	10	90	6.92	1.620	383.85	144

ตารางผนวกที่ 10 ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2

อัตราการน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.43	0	30	6.79	1.721	326.80	102
0.43	0	60	6.98	1.053	254.45	98
0.43	0	90	7.74	0.895	184.85	92
0.43	1	30	6.78	1.858	345.45	124
0.43	1	60	6.92	1.376	260.35	120
0.43	1	90	7.58	1.030	209.35	100
0.43	2	30	6.76	1.875	348.10	134
0.43	2	60	6.83	1.390	265.65	126
0.43	2	90	7.30	1.121	222.55	95
0.43	3	30	6.75	1.896	387.54	134
0.43	3	60	6.78	1.533	269.40	130
0.43	3	90	7.09	1.219	249.75	104
0.43	4	30	6.69	2.016	408.80	140
0.43	4	60	6.80	1.570	280.40	132
0.43	4	90	6.98	1.224	265.00	106
0.43	5	30	6.68	2.089	416.15	142
0.43	5	60	6.78	1.618	307.15	132
0.43	5	90	6.91	1.231	269.20	112
0.43	6	30	6.68	2.192	418.00	150
0.43	6	60	6.74	1.653	307.75	140
0.43	6	90	6.83	1.308	271.00	116
0.43	7	30	6.67	2.233	422.05	150
0.43	7	60	6.71	1.801	339.95	142

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.43	7	90	6.78	1.421	284.15	118
0.43	8	30	6.66	2.277	475.45	162
0.43	8	60	6.69	1.820	396.64	142
0.43	8	90	6.79	1.499	281.45	128
0.43	9	30	6.65	2.278	542.50	166
0.43	9	60	6.69	1.823	402.75	156
0.43	9	90	6.76	1.524	284.90	146
0.43	10	30	6.33	2.287	554.50	174
0.43	10	60	6.69	1.936	485.25	160
0.43	10	90	6.80	1.571	394.35	148

ตารางผนวกที่ 11 ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 1

อัตราการน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.65	0	30	6.72	2.005	387.09	140
0.65	0	60	7.08	1.174	322.20	108
0.65	0	90	7.89	1.092	279.95	80
0.65	1	30	6.72	2.02	350.90	148
0.65	1	60	6.87	1.409	331.00	138
0.65	1	90	7.40	1.282	315.20	96
0.65	2	30	6.71	2.235	444.50	148
0.65	2	60	6.80	1.543	369.55	138
0.65	2	90	7.06	1.422	331.55	102
0.65	3	30	6.70	2.354	471.00	148
0.65	3	60	6.79	1.823	421.75	144
0.65	3	90	6.98	1.534	352.50	120
0.65	4	30	6.68	2.456	483.35	168
0.65	4	60	6.78	1.892	424.70	148
0.65	4	90	6.93	1.603	343.45	132
0.65	5	30	6.67	2.501	504.00	192
0.65	5	60	6.76	2.009	462.30	152
0.65	5	90	6.90	1.720	404.95	132
0.65	6	30	6.62	2.518	510.50	176
0.65	6	60	6.75	2.064	465.05	160
0.65	6	90	6.88	1.794	412.45	140
0.65	7	30	6.61	2.519	511.50	180
0.65	7	60	6.75	2.088	471.35	168

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.65	7	90	6.88	1.847	412.95	140
0.65	8	30	6.61	2.553	520.50	180
0.65	8	60	6.73	2.147	474.40	192
0.65	8	90	6.87	1.887	415.00	144
0.65	9	30	6.61	2.632	660.50	204
0.65	9	60	6.73	2.309	536.00	192
0.65	9	90	6.84	1.955	436.65	144
0.65	10	30	6.56	2.729	679.50	206
0.65	10	60	6.72	2.388	548.00	198
0.65	10	90	6.83	2.216	522.50	148

ตารางผนวกที่ 12 ที่อัตราการน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ ของเปลือกไข่ไก่ครั้งที่ 2

อัตราการน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.65	0	30	6.90	1.912	390.84	150
0.65	0	60	7.16	1.228	325.50	102
0.65	0	90	7.89	1.029	253.35	92
0.65	1	30	6.88	2.008	366.60	162
0.65	1	60	6.91	1.524	336.30	144
0.65	1	90	7.37	1.378	314.60	100
0.65	2	30	6.87	2.112	456.60	162
0.65	2	60	6.89	1.624	396.80	144
0.65	2	90	7.10	1.416	344.90	108
0.65	3	30	6.82	2.184	467.70	168
0.65	3	60	6.88	1.774	430.85	152
0.65	3	90	6.98	1.471	384.10	120
0.65	4	30	6.82	2.233	489.80	168
0.65	4	60	6.87	1.877	435.90	152
0.65	4	90	6.96	1.577	385.45	134
0.65	5	30	6.80	2.298	503.45	184
0.65	5	60	6.86	1.906	461.30	160
0.65	5	90	6.93	1.579	406.85	136
0.65	6	30	6.78	2.375	505.60	188
0.65	6	60	6.82	1.927	468.55	164
0.65	6	90	6.90	1.644	407.50	140
0.65	7	30	6.78	2.387	519.50	186
0.65	7	60	6.80	2.056	485.50	168

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

อัตราน้ำล้นเชิง ปริมาตร ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	เวลา (hr)	ความสูง (cm)	พีเอช	สี (Abs)	ทีโอซี (mg/l)	ของแข็งแขวนลอย (mg/l)
0.65	7	90	6.89	1.733	417.00	160
0.65	8	30	6.78	2.387	538.00	188
0.65	8	60	6.79	2.068	490.00	174
0.65	8	90	6.89	1.834	427.95	168
0.65	9	30	6.77	2.413	596.00	208
0.65	9	60	6.78	2.232	529.50	184
0.65	9	90	6.87	1.834	459.00	170
0.65	10	30	6.70	2.500	601.00	210
0.65	10	60	6.68	2.339	543.00	204
0.65	10	90	6.84	2.073	512.00	170

ตารางผนวกที่ 13 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของถ่านกัมมันต์

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	27.62	72.51	76.19	7.99
0	60	98.39	78.72	86.75	8.52
0	90	99.44	99.28	95.89	8.50
1	30	22.42	89.96	64.06	7.91
1	60	98.50	94.96	84.89	8.45
1	90	99.30	99.55	95.53	8.46
2	30	15.57	91.22	62.89	7.89
2	60	84.90	96.02	84.17	8.43
2	90	99.03	99.48	93.79	8.47
3	30	13.82	89.31	58.54	7.83
3	60	75.33	94.79	83.81	8.40
3	90	98.26	98.53	92.30	8.48
4	30	12.10	81.78	56.97	7.70
4	60	59.42	94.28	80.79	8.34
4	90	97.95	98.20	91.22	8.49
5	30	10.38	76.97	51.57	7.68
5	60	37.60	91.68	79.21	8.28
5	90	96.79	97.41	89.73	8.51
6	30	6.93	78.58	48.59	7.64
6	60	23.20	90.01	75.71	8.25
6	90	87.31	96.12	88.96	8.51
7	30	6.24	76.66	45.97	7.60
7	60	17.14	82.80	74.90	8.20
7	90	80.70	93.00	88.20	8.53

ตารางผนวกที่ 13 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	5.20	72.91	42.10	7.53
8	60	13.01	82.34	71.88	8.12
8	90	54.27	91.20	86.58	8.46
9	30	4.33	70.78	25.78	7.50
9	60	11.83	78.37	69.10	8.08
9	90	43.42	90.34	84.37	8.37
10	30	1.71	66.27	14.30	7.49
10	60	11.62	73.89	64.42	8.09
10	90	32.48	87.31	79.86	8.37

ตารางผนวกที่ 14 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของถ่านกัมมันต์

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	21.05	71.61	81.63	7.71
0	60	92.15	95.74	89.41	8.25
0	90	99.30	97.44	96.90	8.35
1	30	24.70	90.77	71.03	7.68
1	60	59.74	90.80	85.78	8.05
1	90	99.18	99.53	96.53	8.34
2	30	18.15	80.43	68.41	7.64
2	60	50.14	85.66	83.40	7.98
2	90	98.59	99.20	95.41	8.28
3	30	15.86	75.11	62.25	7.53
3	60	53.16	84.63	78.85	7.97
3	90	75.32	91.02	94.64	8.21
4	30	26.97	72.67	57.41	7.54
4	60	45.94	82.11	75.30	7.95
4	90	72.28	90.00	90.66	8.27
5	30	24.04	72.21	56.24	7.50
5	60	24.05	80.53	74.14	7.89
5	90	67.93	87.38	88.00	8.17
6	30	19.64	70.71	55.52	7.50
6	60	22.64	80.61	71.03	7.87
6	90	66.54	86.19	84.93	8.18
7	30	18.87	70.53	49.51	7.42
7	60	19.10	78.02	70.27	7.82
7	90	51.90	85.62	83.40	8.14

ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	17.51	67.41	40.00	7.51
8	60	16.37	76.94	69.46	7.81
8	90	35.54	84.16	80.66	8.16
9	30	16.17	65.98	38.06	7.32
9	60	23.70	74.76	63.66	7.75
9	90	32.59	82.69	77.72	8.07
10	30	9.55	62.93	22.59	7.21
10	60	15.09	74.03	60.55	7.70
10	90	20.88	77.57	71.92	8.06

ตารางผนวกที่ 15 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของถ่านกัมมันต์

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	20.56	58.70	64.83	7.67
0	60	80.77	74.81	77.80	7.93
0	90	98.79	99.70	92.30	8.23
1	30	22.85	90.07	62.97	7.68
1	60	29.56	90.26	73.25	7.75
1	90	98.76	99.06	85.54	7.96
2	30	22.42	74.10	55.68	7.59
2	60	14.63	77.89	69.02	7.65
2	90	53.48	85.48	82.60	7.84
3	30	18.15	72.40	54.87	7.47
3	60	15.62	76.60	68.65	7.56
3	90	40.80	81.33	77.76	7.76
4	30	16.61	68.21	53.38	7.59
4	60	11.52	74.16	59.87	7.42
4	90	25.02	80.92	75.06	7.67
5	30	12.03	60.71	50.24	7.17
5	60	14.61	71.58	59.15	7.46
5	90	14.41	76.54	69.66	7.66
6	30	10.90	48.77	44.40	7.03
6	60	11.97	59.31	57.21	7.42
6	90	13.05	75.84	66.48	7.59
7	30	7.29	45.47	46.45	6.88
7	60	11.68	56.58	54.07	7.35
7	90	12.22	70.46	65.76	7.49

ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	4.20	44.96	46.49	6.80
8	60	11.47	50.58	52.58	7.31
8	90	10.53	62.41	64.22	7.46
9	30	1.73	43.05	38.60	6.71
9	60	7.71	50.34	50.68	7.23
9	90	9.04	60.75	58.38	7.43
10	30	2.01	42.58	33.60	6.54
10	60	8.41	46.31	47.18	7.18
10	90	11.71	54.89	56.49	7.37

ตารางผนวกที่ 16 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของเปลือกไข่ไก่

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	48.21	74.01	59.45	6.98
0	60	62.38	85.54	63.89	7.35
0	90	67.78	86.85	68.83	7.79
1	30	43.90	72.80	55.71	6.91
1	60	61.85	78.72	61.53	7.29
1	90	73.59	84.67	66.69	7.55
2	30	44.31	72.26	49.13	6.88
2	60	59.04	78.16	56.80	7.17
2	90	67.83	81.10	65.54	7.56
3	30	43.38	70.90	47.83	6.87
3	60	57.67	77.70	56.80	7.09
3	90	67.11	80.19	64.32	7.53
4	30	42.45	70.59	45.39	6.85
4	60	56.22	74.70	53.93	6.99
4	90	61.62	80.28	63.10	7.40
5	30	41.73	67.85	42.39	6.83
5	60	55.39	72.79	51.49	6.95
5	90	63.35	80.00	59.45	7.36
6	30	36.50	67.37	39.59	6.77
6	60	55.04	72.63	49.63	6.95
6	90	61.13	79.05	58.66	7.30
7	30	32.38	64.69	37.81	6.72
7	60	54.79	69.59	48.13	6.87
7	90	58.18	77.42	53.85	7.26

ตารางผนวกที่ 16 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	32.18	62.69	37.02	6.71
8	60	53.57	68.74	45.55	6.83
8	90	57.54	73.93	52.78	7.14
9	30	27.40	59.55	36.66	6.69
9	60	52.54	68.53	40.02	6.84
9	90	56.22	71.96	51.64	7.12
10	30	23.74	55.68	27.33	6.69
10	60	49.10	70.15	38.52	6.84
10	90	53.21	68.53	48.77	7.08

ตารางผนวกที่ 17 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของเปลือกไข่ไก่

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	39.05	73.31	59.37	6.86
0	60	59.99	78.88	60.95	7.21
0	90	69.30	84.77	62.88	7.74
1	30	35.63	71.85	49.84	6.85
1	60	51.69	78.50	54.00	7.06
1	90	63.18	83.01	61.02	7.65
2	30	35.14	71.36	48.05	6.82
2	60	52.58	78.22	52.93	6.90
2	90	58.64	81.16	61.92	7.39
3	30	34.42	68.45	46.33	6.81
3	60	48.13	78.07	49.63	6.87
3	90	54.71	79.31	60.31	7.23
4	30	27.46	67.15	42.24	6.77
4	60	46.60	77.29	47.98	6.86
4	90	47.40	78.00	59.52	7.23
5	30	24.24	66.47	41.45	6.75
5	60	43.62	74.40	47.55	6.84
5	90	57.63	77.29	56.72	6.99
6	30	22.29	65.92	39.16	6.74
6	60	42.52	74.29	45.26	6.82
6	90	54.38	77.22	54.29	6.91
7	30	21.22	64.70	38.30	6.73
7	60	37.98	72.58	44.04	6.78
7	90	51.24	76.69	53.50	6.87

ตารางผนวกที่ 17 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	18.45	61.50	34.86	6.71
8	60	36.17	68.35	43.18	6.74
8	90	46.73	76.68	49.99	6.85
9	30	18.41	55.35	32.43	6.69
9	60	34.96	66.50	39.38	6.73
9	90	46.16	76.11	43.33	6.83
10	30	17.19	53.43	29.27	6.48
10	60	32.11	59.76	34.79	6.76
10	90	44.14	68.04	42.54	6.86

ตารางผนวกที่ 18 ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยที่อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร $0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$
ของเปลือกไข่ไก่

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ย (%)			ค่าพีเอชเฉลี่ย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
0	30	31.42	68.04	43.04	6.81
0	60	57.98	73.39	58.51	7.12
0	90	62.86	78.05	66.33	7.89
1	30	29.50	70.54	39.17	6.80
1	60	48.71	72.59	44.54	6.89
1	90	53.48	74.12	61.45	7.39
2	30	23.88	62.99	39.17	6.79
2	60	44.60	68.55	44.54	6.85
2	90	50.33	72.22	58.73	7.08
3	30	20.52	61.42	38.10	6.76
3	60	37.03	64.98	41.82	6.84
3	90	47.39	69.78	52.71	6.98
4	30	17.86	60.02	33.79	6.75
4	60	34.03	64.65	40.96	6.83
4	90	44.34	70.11	47.62	6.95
5	30	15.95	58.60	25.76	6.74
5	60	31.45	62.05	38.67	6.81
5	90	42.22	66.64	47.27	6.92
6	30	14.32	58.24	28.50	6.70
6	60	30.11	61.64	36.23	6.79
6	90	39.78	66.30	44.83	6.89
7	30	14.10	57.65	27.99	6.70
7	60	27.47	60.70	33.79	6.78
7	90	37.31	65.90	41.26	6.89

ตารางผนวกที่ 18 (ต่อ)

เวลา (hr)	ความสูง (cm)	ประสิทธิภาพการกำจัดเนลีย (%)			ค่าพีเอช เนลีย
		สี	ทีโอซี	ของแข็งแขวนลอย	
8	30	13.49	56.53	27.64	6.70
8	60	26.21	60.40	27.55	6.76
8	90	34.86	65.38	38.97	6.88
9	30	11.64	48.27	18.89	6.69
9	60	20.50	56.21	25.76	6.76
9	90	33.65	63.23	38.61	6.86
10	30	8.41	47.26	18.10	6.63
10	60	17.26	55.16	20.90	6.70
10	90	24.89	57.47	37.75	6.84

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววีริยา วิริยะเขมม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 สิงหาคม 2526
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี พ.ศ.2549