



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการฟenton และกระบวนการสร้างตะกอน
ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

Organic Compounds and Color Removal by Fenton and Coagulation Processes in
Textile Wastewater

นามผู้วิจัย นางสาววิระนุช บุญรุ่ง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จีมา ศรีลัมพ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการฟenton และกระบวนการสร้างตะกอน
ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

Organic Compounds and Color Removal by Fenton and Coagulation Processes
in Textile Wastewater

โดย

นางสาววีระนุช บุญรุ่ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วีระนุช บุญรุ่ง 2553: การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการ
การสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, M.Eng.
125 หน้า

ทดลองการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการเฟนตัน ($\text{FeSO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$)
และกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดย
ใช้เครื่องจาร์เรสต์ กวนเร็วที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที กวนช้าที่ความเร็ว 40
รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที

สภาวะที่เหมาะสมของเฟนตันใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.92 กรัมต่อลิตร ไฮโดรเจน
เปอร์ออกไซด์ 6.38 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 3.4 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ
ระยะเวลาสูงสุดที่ตั้งไว้ 150 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เท่ากับ
97.85, 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอะลูมิเนียมซัลเฟตใช้ปริมาณสารสร้างตะกอน
2.56 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 7.20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เท่ากับ 94.02,
76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ใช้ปริมาณสารสร้างตะกอน
4.00 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 7.40 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เท่ากับ 96.12,
86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของสารเคมีทั้ง 3 ชนิด พบว่าเฟนตันให้
ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด รองลงมาคือ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมซัลเฟต
ตามลำดับ ส่วนค่าใช้จ่ายในการบำบัดเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์
เท่ากับ 125.32, 25.79 และ 83.15 บาท/ลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย ตามลำดับ

Weeranuch Boonrung 2010: Organic Compounds and Color Removal by Fenton and Coagulation Processes in Textile Wastewater. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Suthep Sirivitayaphakorn, M.Eng. 125 pages.

The textile wastewater was carried out using fenton's process ($\text{FeSO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$), chemical coagulation by aluminium sulfate and poly aluminium chloride with jar test. The jar test was set at rapid mixing 100 rpm for 10 minute then turn down to slow mixing 40 rpm for 30 minute and stop to wait for 30 minute.

The suitable conditions of fenton were 0.92 g/l of ferrous sulfate and 6.38 g/l of hydrogen peroxide at pH 3.4 and time for reaction of 150 minute. The treatment efficiencies for turbidity, color and COD were 97.85, 52.83 and 79.98 % respectively. Using aluminium sulfate amount 2.56 g/l at pH 7.20 the treatment efficiencies for turbidity, color and COD were 94.02, 76.28 and 42.96 % respectively. Using poly aluminium chloride amount 4.00 g/l at pH 7.40 the treatment efficiencies for turbidity, color and COD were 96.12, 86.75 and 54.18 % respectively.

The best treatment efficiency was fenton. The treatment costs of fenton, aluminium sulfate and poly aluminium chloride were 125.32, 25.79 and 83.15 baht / m^3 of wastewater respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในหลายภาคส่วนที่ได้ช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี ที่สำคัญยิ่ง ต้องขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มา ศรีลัมพ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและการสนับสนุนต่างๆ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ทูตสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2551 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย ที่ได้ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และขอขอบพระคุณ0 คุณกาญจนา ทวยเวียง และ1 คุณ2ปิยะกาญจน์ บุญสุวรรณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อ และอำนวยความสะดวก อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังขอขอบพระคุณ คุณประสิทธิ์ มิลินทานนท์ ผู้จัดการฝ่ายบุคคล บริษัทโรงงาน พิมพ์ซ่อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุน และอำนวยความสะดวก ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และคุณธีรศักดิ์ ทับทิม ได้ช่วยเหลือในการไปเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการวิเคราะห์จนถึงสิ้นการทดลอง

วีระนุช บุญรุ่ง

มกราคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	67
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก ผลการทดลองบำบัดน้ำเสีย	71
ภาคผนวก ข ภาพผลการทดลอง	115
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	118
ภาคผนวก ง การตรวจวัดสีในหน่วยเอสยู	122
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อมูลคุณภาพน้ำเสียเฉลี่ยจากโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	13
2	วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง	34
3	ผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	37
4	ผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	48
5	ผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของโพตัสเซียมคลอไรด์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	55
6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และ โพตัสเซียมคลอไรด์	61
7	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	62
8	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	63
 ตารางผนวกที่		
ก1	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	73
ก2	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	73
ก3	น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเฟนตัน	74
ก4	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	74
ก5	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	75
ก6	น้ำเสียชุดที่ 1 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม	75
ก7	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1 โดยเฟนตันที่ระยะเวลา 150 นาที	76
ก8	น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก32	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	90
ก33	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณฟอร์สซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	91
ก34	น้ำเสียชุดที่ 5 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม	91
ก35	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 5 โดยเฟนตันที่ระยะเวลา 150 นาที	92
ก36	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1-5 โดยเฟนตัน	92
ก37	ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเหล็ก และ ซัลเฟตตกค้างหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน	92
ก38	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	93
ก39	น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต	94
ก40	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	94
ก41	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 1 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	95
ก42	น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	95
ก43	น้ำเสียชุดที่ 2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต	96
ก44	น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	96
ก45	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 2 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	97
ก46	น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	97
ก47	น้ำเสียชุดที่ 3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต	98
ก48	น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	98
ก49	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 3 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	99
ก50	น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	99
ก51	น้ำเสียชุดที่ 4 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต	100
ก52	น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก53	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 4 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	101
ก54	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ	101
ก55	น้ำเสียชุดที่ 5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต	102
ก56	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด	102
ก57	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 5 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	103
ก58	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1 - 5 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	103
ก59	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	104
ก60	น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพตัสเซียมคลอไรด์	105
ก61	น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	105
ก62	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 1 ใช้โพตัสเซียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน	106
ก63	น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	106
ก64	น้ำเสียชุดที่ 2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพตัสเซียมคลอไรด์	107
ก65	น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	107
ก66	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 2 ใช้โพตัสเซียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน	108
ก67	น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	108
ก68	น้ำเสียชุดที่ 3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพตัสเซียมคลอไรด์	109
ก69	น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	109
ก70	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 3 ใช้โพตัสเซียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน	110
ก71	น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณโพตัสเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	110
ก72	น้ำเสียชุดที่ 4 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพตัสเซียมคลอไรด์	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก73	น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	111
ก74	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 4 ใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน	112
ก75	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ	112
ก76	น้ำเสียชุดที่ 5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	113
ก77	น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด	113
ก78	สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 5 ใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน	114
ก79	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1-5 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน	114

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ	8
2	กระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)	13
3	สารเคมีช่วยตกตะกอนช่วยลดแรงผลักดันระหว่างอนุภาค	14
4	กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน	15
5	ผลของการเติมโอโซนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมโอโซน (ข) หลังจากการเติมโอโซนแล้ว	16
6	โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PAC และ Alum	19
7	เครื่องจาร์เทสต์	21
8	ขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสีย	35
9	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ของการทดลองชุดที่ 1- 5 ด้วยเฟนตัน	39
10	ผลของค่า pH (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1-5	40
11	ผลของ H_2O_2 (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1-5	42
12	ผลของ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1-5	43
13	ผลของระยะเวลา (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1-5	45
14	ปริมาณเหล็ก (ก) และ ซัลเฟต (ข) ที่ตกค้างหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันชุดที่ 2 และชุดที่ 5	47
15	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ของการทดลองชุดที่ 1-5 โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน	50
16	ผลของค่า pH (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1-5	51
17	ผลของอะลูมิเนียมซัลเฟต (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1-5	52
18	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ของการทดลองชุดที่ 1-5 โดยใช้โพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน	57
19	ผลของค่า pH (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1-5	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ก-จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1-5	59
21	ประสิทธิภาพการบำบัดของเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	61
22	ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	62
ภาพผนวกที่		
ข1	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันที่ pH น้ำดิบ	116
ข2	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน	116
ข3	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต	116
ข4	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	117
ข5	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	117
ง1	กราฟตัวอย่างการคำนวณเรื่องเอสยู	123
ง2	กราฟเปรียบเทียบค่าเอสยูและความเข้มของสี	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Fenton	=	กระบวนการเฟนตัน
Fe^{2+}	=	เฟอร์รัสไอออน
Fe^{3+}	=	เฟอร์ริกไอออน
H_2O_2	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	=	เฟอร์รัสซัลเฟต
H_2SO_4	=	กรดซัลฟูริก
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
OH^-	=	อนุมูลไฮดรอกซิล
Alum	=	สารส้ม
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	=	อะลูมิเนียมซัลเฟต
PAC	=	โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์
COD	=	ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี
N	=	นอร์มัล
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
g/l	=	กรัมต่อลิตร
min	=	นาที

การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอน
ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

Organic Compounds and Color Removal by Fenton and Coagulation
Processes in Textile Wastewater

คำนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ผลที่ตามมา คือ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทั้งทางน้ำและอากาศ โรงงานฟอกย้อมเป็นหนึ่งในจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทที่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ เนื่องจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีการใช้สารเคมี สีย้อม สีย้อม สีย้อม สีย้อม สีย้อม ฯลฯ มาใช้ในการผลิตทำให้เกิดสีปน ลวดลาย อรรถประโยชน์ เช่น กันน้ำ กันไฟ กันแสงยูวี กันน้ำมัน ชักง่ายแห้งเร็ว ไม่ต้องรีด มีรอยยับถาวร คีนตัวได้ดี ฯลฯ กรรมวิธีการผลิตมีการใช้น้ำสีย้อม กรด ด่าง สารเคมี เป็นต้น ปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นของสีมาก สภาพความเป็นด่าง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความขุ่น บีโอดี ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณของแข็ง ละลายน้ำทั้งหมดในปริมาณที่สูง ทำให้มีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำหากปล่อยน้ำเสียจากโรงงานเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการลดสี และสารอินทรีย์ก่อน นอกจากจะทำให้ไม่สวยงามแล้วยังบดบังการกระจายของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำเกิดการเน่าเสียไม่สามารถใช้ประโยชน์ และเสียสมดุลของระบบนิเวศน์ได้

เพื่อรักษาสภาพแวดล้อม โรงงานต้องมีกระบวนการกำจัดมลสารเหล่านี้ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่มีระบบบำบัดน้ำเสียเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ และระบบบำบัดทางเคมี แต่การบำบัดบางวิธีให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ อันมีสาเหตุหลายประการ เช่น ระบบบำบัดไม่มีประสิทธิภาพ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีปริมาณมากเกินไปเกินความสามารถที่ระบบจะรับได้ หรือในระบบบำบัดทางชีวภาพมีสารพิษเข้ามาทำให้อินทรีย์ลดลงเหล่านี้ เป็นต้น

ดังนั้นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการกำจัดสารอินทรีย์ และสีที่มีประสิทธิผล คือการใช้เฟนตัน แทนสารสร้างตะกอนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะ เฟนตันเป็นสารที่สามารถสร้างอนุมูล

ไฮดรอกซิลให้เกิดขึ้นได้ง่ายที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถย่อยสลายสารเคมีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มาเปรียบเทียบกับทั้งสองกระบวนการ คือ ใช้สารสร้างตะกอนแบบเดิม และการใช้เฟนตัน ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสี ปริมาณสารเคมีที่ใช้ รวมทั้งประเมินค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัดด้วย



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการกำจัดสารอินทรีย์ และสีที่มีปริมาณสูงๆ ด้วยกระบวนการฟenton (fenton process) และกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation process)
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ และสีในน้ำเสียของกระบวนการฟenton (fenton process) และกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation process)
3. เพื่อประเมินให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าใช้จ่ายในการเลือกสารเคมีไปบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม

สมมติฐาน

เมื่อมีการเติมสารสร้างตะกอน และ fenton reagent ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านกระบวนการทำอาร์เทสต์แล้วปริมาณสารอินทรีย์ (COD) และสีจะมีปริมาณลดลง

ตัวแปรในการศึกษา

1. ตัวแปรต้น : ปริมาณสาร fenton reagent, aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และ poly aluminum chloride (PAC) ค่าพีเอช และระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน
2. ตัวแปรตาม : การลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ และสี
3. ตัวแปรควบคุม : ปริมาณน้ำเสีย ความเร็วรอบในการกวนเร็ว และกวนช้า

ขอบเขตการศึกษา

1. การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

2. เป็นการทดลองหาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยสารสร้างตะกอนที่ใช้ คือ fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$) , aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และ poly aluminum chloride (PAC) ทำการทดลองด้วยเครื่อง jar test

3. ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสาร ค่าพีเอช และระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

4. พารามิเตอร์ที่ทำการประเมิน คือ พีเอช ความขุ่น สี และ COD ส่วนเฟ้นต้นวัดปริมาณสารตกค้าง คือ เหล็ก และซัลเฟตด้วย

5. ประเมินผลการวิจัยที่ได้ทั้งสถานะที่เหมาะสม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน และประเมินค่าใช้จ่าย

การตรวจเอกสาร

1. อุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถแบ่งเป็นหลายอุตสาหกรรม ดังนี้

1.1 อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber manufacturing industries)

อุตสาหกรรมนี้จะมีการนำเอาชิป หรือเม็ดพลาสติกที่เหมาะสมกับการทำให้เกิดเส้นใยทางสิ่งทอมาผ่านกระบวนการ 3 แบบ คือ กระบวนการปั่นด้ายแบบแห้ง (dry spinning) กระบวนการปั่นด้ายแบบเปียก (wet spinning) และกระบวนการปั่นด้ายแบบหลอมละลาย (melt spinning)

1.2 อุตสาหกรรมปั่นด้าย (spinning industries) เส้นใย เส้นด้าย จะต้องผ่านกระบวนการปั่นด้าย ซึ่งกระบวนการนี้มักจะใช้กับเส้นใยสั้น เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยฝ้ายผสมเส้นใยอื่นๆ เป็นต้น ต่อจากนั้นมีการตีเกลียวทำให้เกิดเส้นด้ายที่แข็งแรง บ้างก็นำเส้นด้ายหลายเส้นมาควั่นกันทำให้เกิดเส้นด้ายขนาดใหญ่ขึ้น ประกอบด้วย เครื่องสางใย หวีใย โรฟวิ่ง ปั่นด้ายวงแหวน เป็นต้น

1.3 อุตสาหกรรมทอผ้า (weaving industries) อุตสาหกรรมนี้จะประกอบด้วยเส้นด้ายยืน (warp yarn) และเส้นด้ายพุ่ง (weft yarn) นำมาสานกัน คล้ายๆ กับสานทำตะกร้า เส้นด้ายยืนจะต้องถูกยกขึ้นขกกลง ด้วยตะกอล และถูกฟันหวีกระแทกเส้นด้ายพุ่งเข้ามาทำให้เกิดผ้าขึ้น ดังนั้นจะต้องมีการลงแป้งด้ายยืน (sizing) ก่อนการสืบด้าย (warping) หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นเครื่องทอผ้า ประกอบด้วย เครื่องลงแป้งด้ายยืน สืบด้ายยืน ทอผ้า (แบบมีกระสวย เรเปียร์ แอร์เจ็ต วอเตอร์เจ็ต คลิป ฯลฯ) ผลผลิตได้ผ้าทอ

1.4 อุตสาหกรรมถักผ้า (knitting industries) อุตสาหกรรมนี้เป็นการผลิตผ้าเช่นกัน แต่ฝ้านั้นจะมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นกว่าการทอผ้า ตัวอย่างคือ ผ้าที่นำมาเย็บเป็นเสื้อยืด ถุงน่องผู้หญิง ถุงเท้า ฯลฯ ประกอบด้วย เครื่องถักผ้าแวนอน แนวคิง ผลผลิตได้ผ้าถัก

1.5 อุตสาหกรรมผ้าไม่ทอ (non-woven industries) อุตสาหกรรมนี้จะนำเอาเส้นใยมาวางเรียงกันอย่างไร้ระเบียบ หรือมีระเบียบบ้าง เป็นแผ่นบางๆ แล้วนำอุปกรณ์ หรือสารเคมีมาทำให้เกิดการยึดเกาะกัน เกิดผ้าขึ้น (ดังนั้นจึงเรียกว่าผ้าไม่ทอ) ประกอบด้วย เครื่องสางใย เครื่องโรยเส้นใย เครื่องเคลือบสารเคมี เครื่องอบผ้าไม่ทอ ฯลฯ ผลผลิตได้ผ้าไม่ทอ (เช่น ฝ้านามัย ฝ้านั่งхамวัวร์ หนังกีฬาสำหรับทำรองเท้าชื่อต่างๆ ฝ้ายพันด้ามไม้เทนนิส ไม้เบดมินตัน ฝ้ายกันเปื้อนใช้แล้วทิ้ง ฝ้ายเอ็นที่ใช้แล้วทิ้ง ฯลฯ)

1.6 อุตสาหกรรมฟอกย้อมพิมพ์ตกแต่งวัสดุสิ่งทอ (textile preparation, dyeing, printing, finishing industries) อุตสาหกรรมนี้มักจะต้องใช้สารเคมี สีย้อม สีพิมพ์ สารตกแต่ง ฯลฯ มาใช้ในการผลิตทำให้เกิดสี สัน ลวดลาย อรรถประโยชน์ เช่น กันน้ำ กันไฟ กันแสงยูวี กันน้ำมัน ชักง่าย แห้งเร็ว ไม่ต้องรีด มีรอยยับถาวร คืนตัวได้ดี ฯลฯ กระบวนการเหล่านี้มักใช้น้ำจำนวนมาก และเป็นแหล่งของมลพิษทางน้ำ และทางอากาศ เนื่องจากไอระเหยของสารเคมี คาร์บอนไดออกไซด์ ไอ น้ำ ฯลฯ ประกอบด้วย เครื่องเตรียมวัสดุสิ่งทอ เครื่องย้อม เครื่องพิมพ์ เครื่องตกแต่ง เครื่องทำแห้ง เครื่องซักล้าง ฯลฯ ผลิต สี สัน ลวดลาย การใช้งานของวัสดุสิ่งทอ จำนวนมาก

1.7 อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป (garment industries) อุตสาหกรรมนี้จะตามมาจากอุตสาหกรรมข้อ 1.6 เพราะถ้านำเอาผ้าผืนดิบมาตัดเย็บเสื้อผ้า เหมือนเสื้อผ้าที่ใช้ในงานกึ่งเด็ก (สพ. คนจีน) ผ้าจะแข็ง และไม่เหมาะสมกับการสวมใส่ ส่วนมากเสื้อผ้าสำเร็จรูป จะมาจากผ้าที่ย้อมพิมพ์ ตกแต่งสิ่งทอ แล้วจึงนำไปตัดเย็บเป็นเสื้อผ้าที่สวยงาม พัดติดตัว เหวลวย สายเดี่ยว ประกอบด้วย เครื่องตัดผ้า จักรเย็บผ้า เครื่องรีดไอน้ำ เครื่องตรวจโลหะ เครื่องติดกระดุม เจาะรั้งคุม เครื่องอัดกลีบ ตีตรา ฯลฯ ผลิต เสื้อผ้าสำเร็จรูป

2. แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปผลิตต่อไป กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการใช้สารเคมี และสีย้อมเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้อาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต ซึ่งถ้าหากคิดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตจะพบโดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตผ้า 1 กิโลกรัม จะใช้น้ำ 167 ลิตร นอกจากนี้การใช้สารเคมีต่างๆ เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ฯลฯ ซึ่งจะเหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อม และจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ เพื่อป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำ และสิ่งแวดล้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อมขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการ เช่น กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ และกระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีขั้นตอนการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และสีย้อมต่างกัน

แหล่งกำเนิดมลสารที่สำคัญ ได้แก่ สิ่งสกปรกตามธรรมชาติที่ปนมากับเส้นใย และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตที่ถูกกำจัดออกจากผ้าแสดงดังภาพที่ 1 และเป็นของเสียปนอยู่กับน้ำทิ้ง และลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นก็ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิตและวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเส้นใย ได้แก่ ฝ้าย ขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น นอกจากนี้แหล่งต่างๆ ที่ก่อให้เกิดน้ำเสียยังมี

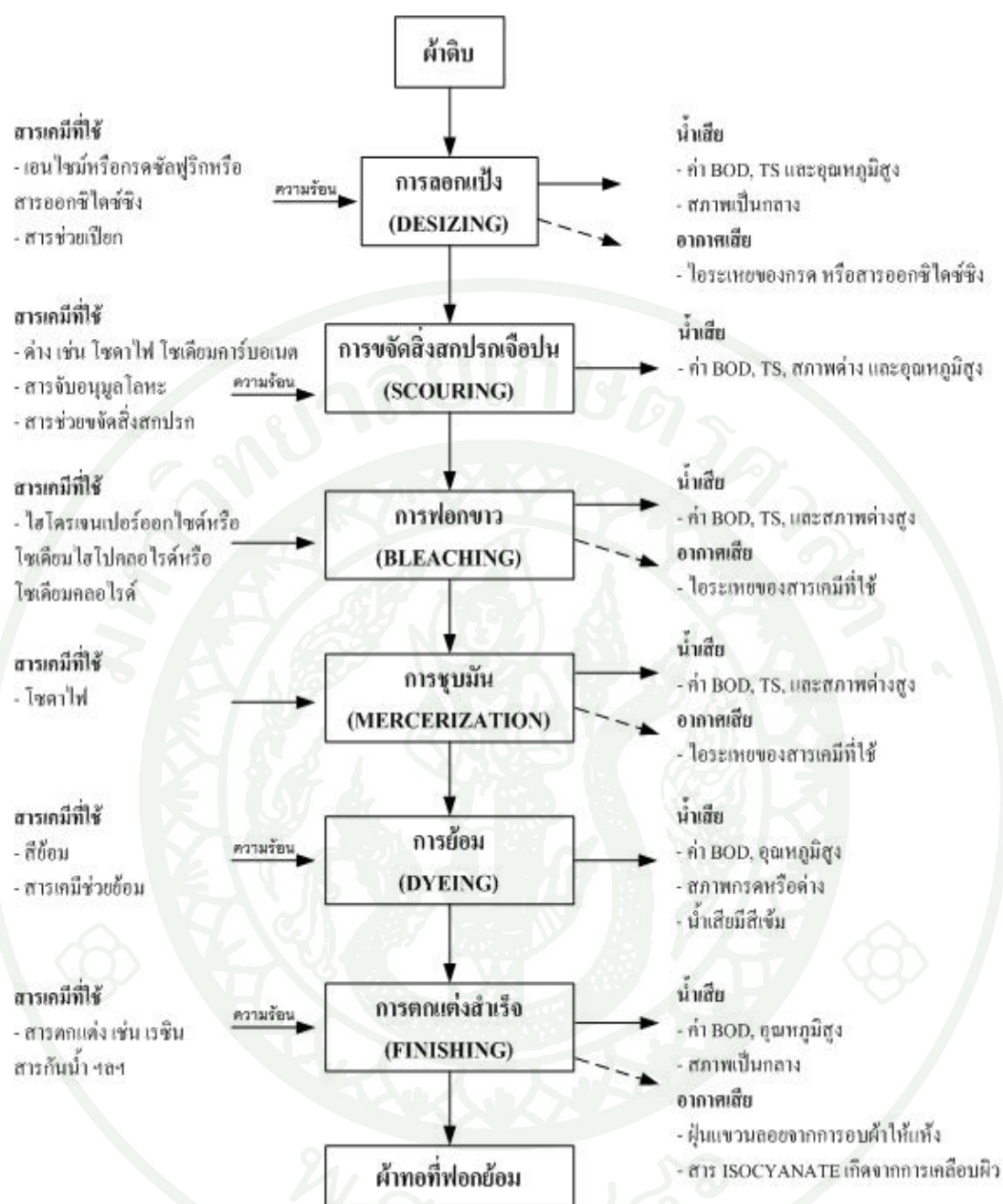
2.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ เช่น น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม และขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้าง แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยเป็นน้ำเสียออกมาเกือบทั้งหมด น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง คือ กระบวนการต้มเบี่ยง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี/การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ปริมาณไม่มากนัก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษสูง และมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อมและกระบวนการย้อมที่ใช้ และน้ำที่ใช้ในการซักล้างหลังจากการฟอกย้อมหรือการพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำกว่าน้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง

2.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต หรือให้ความร้อนแก่ตู้อบไอน้ำ ไอน้ำนี้ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงและทำให้เกิดการกลั่นตัวในท่อน้ำก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้านำไอน้ำนี้ไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงก็เท่ากับไปเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากขึ้น

2.3 น้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลงในระยะเวลาอันสั้นโดยใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร และการทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆ สูง เช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนในการ พิมพ์ผ้า หรือน้ำล้างถังเตรียมสี

2.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำจากโรงอาหาร และห้องน้ำในโรงงาน เป็นต้น



ภาพที่ 1 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2542)

3. ปัญหาที่เกิดจากสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

- 3.1 ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
- 3.2 สีข้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
- 3.3 ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
- 3.4 การผลิตออกซิเจนลดลง ส่งผลต่อสัตว์น้ำ
- 3.5 ความเป็นพิษของตัวสีข้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง
- 3.6 สภาพของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ สัตว์น้ำอาจตาย มีจำนวนลดน้อยลง
- 3.7 น้ำเสียมีอุณหภูมิสูงมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง เพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์
- 3.8 สารอินทรีย์ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเองได้ทัน เกิดกลิ่น ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

4. สีของน้ำเสีย

สีของน้ำที่ปรากฏให้เห็นโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

4.1 สีแท้หรือสีจริง (true color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งสารที่ทำให้เกิดสีแท้ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และสารประกอบของสารประกอบทั้งสามดังกล่าว เช่น สารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นพวกอนุภาค (colloid)

4.2 สีปรากฏ (apparent color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ

เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ หรืออาจเกิดจากการสะท้อนของท้องฟ้า สิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำที่ทำให้เกิดสีปรากฏ ได้แก่ พืชเล็ก ๆ ในน้ำ เช่น แพลงตอนพืช (phytoplankton) และแพลงตอนสัตว์ (zooplankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย สิ่งทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกันโดยใช้วิธีหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ซึ่งพวกสีปรากฏจะตกตะกอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน และเมื่อสามารถกำจัดสีปรากฏออกไปได้ ทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้ สำหรับสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมเส้นไหมเกิดจากการใช้สีย้อมในกระบวนการย้อม ซึ่งอนุภาคของสีย้อมเหล่านี้จะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย อันเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียเกิดสีขึ้น อนุภาคของสีย้อมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดสีในน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคของสีย้อม จะทำให้เกิดสีแท้ในน้ำเสีย

5. การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึงการกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี ดังนี้

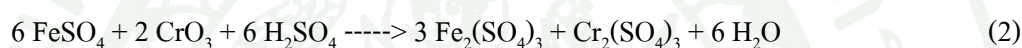
5.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ด่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอน โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีความคุ้มค่าสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้เมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม เกลือเหล็ก และเกลือของแคลเซียม ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม activated ของ silica และ polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี เช่น

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อยด้วยคลอรีน ดังปฏิกิริยาที่ (1)



การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วยเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังปฏิกิริยาที่ (2)



การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

5.2 กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

5.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50 - 65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ประมาณ 20 - 30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การคัดด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้

ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

5.4 กระบวนการทางกายภาพ - เคมี (physical-chemical process) เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

5.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

5.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียนับกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

6. การบำบัดน้ำเสียโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

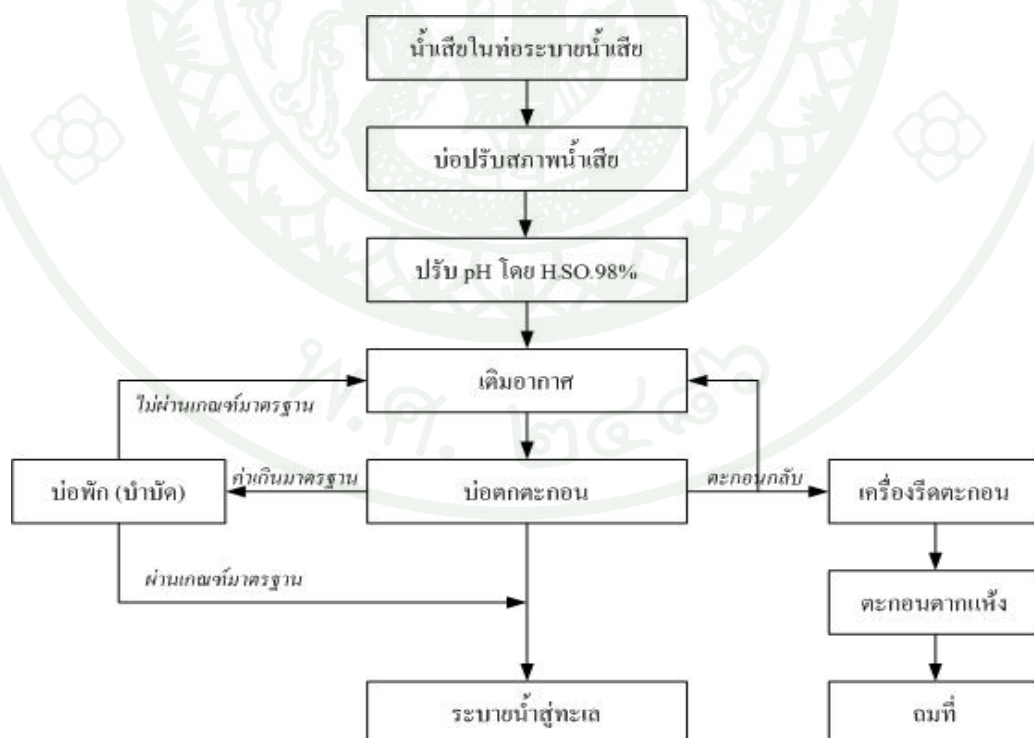
โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) เป็นอุตสาหกรรมที่ทำการฟอก ย้อม พิมพ์ ลงแปรง ทำให้สำเร็จรูปหรือกรรมวิธีใดซึ่งผ้าฝ้าย ผ้าไหม ผ้าแพร ผ้าไหมเทียม และมีการใช้สีในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สีดิสเพอร์ส สีรีแอทีฟ สีฟักเมนต์ สีแเว็ต เป็นต้น มีน้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบประมาณ 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คุณภาพน้ำเสียมีความเป็นด่าง สีเข้ม และปริมาณสารอินทรีย์สูง แสดงในตารางที่ 1

ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานใช้เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ มีกระบวนการบำบัดน้ำเสียแสดงดังภาพที่ 2 โดยน้ำเสียจะถูกปล่อยรวบรวมเข้าสู่ท่อระบายน้ำเสียรวม จากนั้นเข้าสู่บ่อปรับสภาพน้ำเสียเนื่องจากโรงงานฟอกย้อมน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมามีสภาพเป็นด่างจัด ต้องใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นในการปรับพีเอชให้เป็นกลาง จากนั้นเข้าสู่บ่อเติมอากาศ และบ่อตกตะกอน ตะกอนที่เกิดขึ้นมีการหมุนเวียนกลับเข้าสู่ระบบ และนำไปถมที่ ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว และผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะถูกระบายออกสู่ทะเล แต่ถ้าไม่ผ่านจะถูกนำกลับไปบำบัดใหม่อีกครั้ง

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณภาพน้ำเสียเฉลี่ยจากโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่วันที่ 3 มกราคม 2551 ถึง วันที่ 22 กรกฎาคม 2551 และ วันที่ 8 ถึง 21 มกราคม 2552

พารามิเตอร์	หน่วย	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (±S.D.)	ค่ามาตรฐาน*
pH	-	12.10	7.76	-	-	5.5-9.0
BOD	mg/l	957.50	22.27	97.67	1.38	60
COD	mg/l	3,518.86	241.48	93.14	2.99	400
SS	mg/l	224.13	37.12	83.44	52.92	150
TKN	mg/l	-	8.39	-	-	100
FAT	mg/l	-	1.39	-	-	5

หมายเหตุ: * ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน



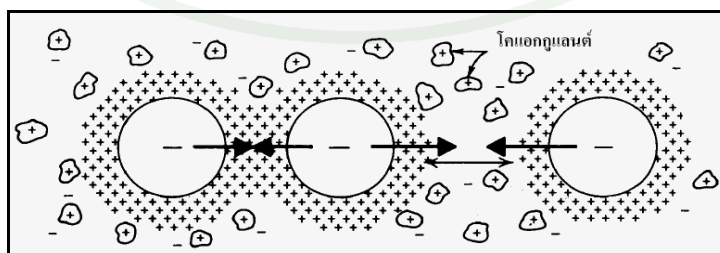
ภาพที่ 2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

7. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (flocculation)

การจัดความขุ่นอันได้แก่สารแขวนลอยต่าง ๆ (suspended solids) รวมทั้งอนุภาคคอลลอยด์ชนิดต่าง ๆ มีวิธีดังนี้ คือการให้น้ำให้ใส (clarification) เป็นกระบวนการที่สารแขวนลอยต่าง ๆ เกิดการจับตัว (coagulation) การรวมตัว (flocculation) และการตกตะกอน (sedimentation) นอกจากนี้ยังต้องใส่สารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอน

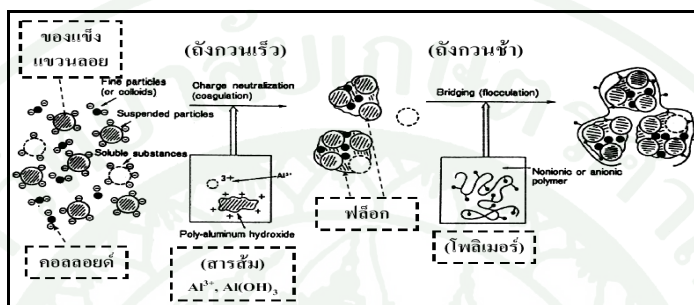
7.1 การจับตัว (coagulation) อนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาด 1-500 มิลลิไมครอน เป็นส่วนหนึ่งของความขุ่นในน้ำ คอลลอยด์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทในน้ำ คือ พวกไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เช่นเศษดินโคลนในน้ำ และพวกชอบน้ำ (hydrophilic) เช่นสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสี แรงที่กระทำบนอนุภาคคอลลอยด์ มีทั้งแรงดึงดูดที่เกิดจาก แรงแวนเดอร์วาล ซึ่งจะดึงดูดให้อนุภาคที่อยู่ใกล้กัน ให้ใกล้ชิดกันมากยิ่งขึ้น และแรงผลักที่เกิดจากประจุบวกที่อยู่บริเวณรอบนอกของอนุภาคจะมีชั้นของประจุบวกล้อมรอบอยู่ จึงพยายามที่จะผลักตัวแยกออกจากกัน ในสภาพปกติ แรงผลักจะมีมากกว่าแรงดึงดูดมาก จึงทำให้อนุภาคคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในน้ำได้ตลอดเวลา

วิธีการทำลายแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ดังแสดงในภาพที่ 3 ทำได้โดยเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารส้ม เหล็กซัลเฟต สารเหล่านี้จะแตกตัวในน้ำเป็นไอออนของโลหะที่มีประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งจะปลดแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ โดยการลดชั้นประจุไฟฟ้าที่ห่อหุ้มอนุภาคไว้ ถ้ามีการกวนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้อนุภาคแตกกัน ซึ่งแรงดูดจะดูดอนุภาคให้ติดกันทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (ภาพที่ 4) ในการเติมสารเคมีช่วยในการตกตะกอน ถ้าใส่สารเคมีมากเกินไป ไอออนประจุบวกของสารเคมีที่แตกตัวจะไปเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคเกิดแรงผลักแยกออกจากกัน แทนที่จะจับตัวกันตกตะกอน ดังนั้นในการใช้สารเคมีถ้าใส่มากเกินไปแทนที่น้ำจะใสก็ขุ่นมากขึ้น



ภาพที่ 3 สารเคมีช่วยตกตะกอนช่วยลดแรงผลักระหว่างอนุภาค

7.2 การรวมตัว (flocculation) ฟล็อกที่เกิดจากการจับตัวของอนุภาคคอลลอยด์ จะมีขนาดไม่ใหญ่พอที่จะตกตะกอนได้ในเวลาอันรวดเร็ว จึงต้องมีการกวนช้า (slow mixing) เพื่อให้ฟล็อกเล็กๆ มีโอกาสจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้นอีก ถ้าหากกวนเร็วหรือแรงเกินไปจะเกิดแรงเฉือนทำให้ฟล็อกแตกออกได้ การใส่สารเคมีพวก polymer หรือ polyelectrolytes ซึ่งจัดเป็นพวก flocculants จะช่วยเพิ่มอัตราการรวมตัวเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ได้โดยง่าย ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน

8. การทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนมี 2 ขั้นตอน คือ

8.1 ทำลายเสถียรภาพ (destabilization) อนุภาคคอลลอยด์ โดยกลไกวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้

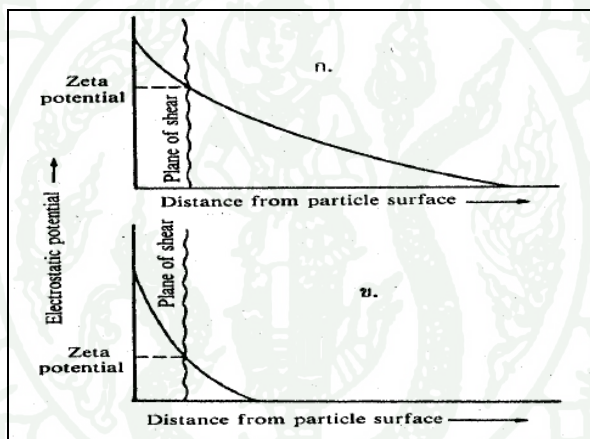
8.1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (zeta potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วยดังภาพที่ 5

8.1.2 กลไกดูดติดผิว และทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption and charge neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ เป็นการทำลายเสถียรภาพนั่นเอง

8.1.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อจะให้อนุภาคของคอลลอยด์มาเกาะจับ (sweep coagulation) เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึกเหมือนวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมามากแล้วรวมกันเป็นฟล็อกได้ กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (optimum dosage) แปรผกผันกับ

ความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำ จะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้น แม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม โคแอกกูเลชันอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมาก สำหรับเป็นสารเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่มีน้ำมีความขุ่นสูงโอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป่าสัมผัสมากเท่ากับกรณีแรก

8.1.4 กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้สารโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้ไอออนเป็นจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟลอค



ภาพที่ 5 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว

ที่มา: พรศักดิ์ (ม.ป.ป.)

8.2 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่หมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัส และเกาะจับกันเป็นก้อน หรือฟลอคคูเลชัน (Flocculation) วิธีการสร้างสัมผัสให้อนุภาคมีหลายวิธี ดังนี้

8.2.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้นวิธีปฏิบัตินี้เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกันเป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัส

เกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคูเลชัน เรียกว่า ถังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อ เทคนิคว่า orthokinetic flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มี ฟล็อกคูเลชันแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 - 1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล

8.2.2 การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจาก การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย อาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า perikinetic flocculation

8.2.3 การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกคูเลชันมาก่อนแล้ว เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

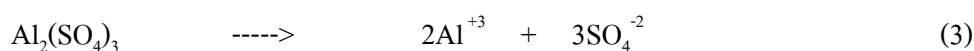
8.2.4 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 - 1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบ orthokinetic flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย

8.2.5 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการนี้ได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

9. สารเคมีที่ใช้สร้างตะกอน (Coagulants)

9.1 อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ สารส้ม (aluminum sulfate, alum) เป็นโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่าย ในราคาที่ไม่แพงมากนัก การใช้สารส้มจะได้ผลดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่า pH และความเป็นด่างเป็นอย่างมาก ยิ่งถ้าใช้สารส้มในปริมาณน้อย สภาพการเกิดฟล็อกขึ้นกับค่า pH มากขึ้น ช่วง pH 6.0 - 7.8 เป็นช่วงที่ดีที่สุดสำหรับสารส้มในการตกตะกอน สารส้มมีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$ ซึ่งโดย

ปกติ * มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ ดังปฏิกิริยาที่ (3)



สารส้มที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยกลไกหลักดังนี้

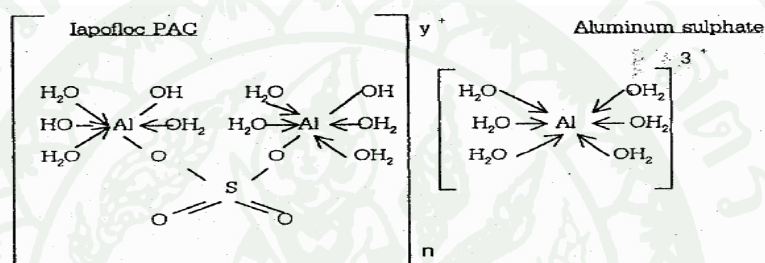
9.1.1 กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (adsorption and charge neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานให้ดีขึ้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไป โคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวก และเกิดเสถียรภาพขึ้นอีกแต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

9.1.2 กลไกแบบกวาด (sweep coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มเกินพอจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยาที่ (4) การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอจนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง



9.1.3 กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (combination coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด

9.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (poly aluminum chloride, PAC) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา โดยเป็นที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปยุโรป PAC ถูกเตรียมขึ้นโดยอะลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 นี้จะทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น $AlCl_3$ หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอะลูมิเนียมโพลิเมอร์ ซึ่งเมื่อเติมสารส้มลงไปในการละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือ 10 - 11 % และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อไปทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียม 2 อะตอม สูตรทั่วไปของ PAC คือ $Al_n(OH)_m Cl_{3n-m}$ ดังภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PAC และ alum



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PAC และ Alum

ที่มา: Viraraghavan และ Wimmer (1988)

เมื่อ PAC ละลายน้ำจะไฮโดรไลซ์ทันทีเป็นอะลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย ซึ่งตัวที่ประสิทธิภาพมากที่สุดคือ $[Al_3(OH)_4]^{+7}$ หรือ Al^{+13} ซึ่งการรวมตัวเป็นอะลูมิเนียมตัวนี้ขึ้นอยู่กับระดับการรวมตัวของด่างกับสารละลายอะลูมิเนียม ชนิดและความเข้มข้นของด่าง ความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ อุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ ปริมาณของด่างที่เติมลงไป และระดับของความปั่นกลาง

10. ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการจับตัว และรวมตัวเป็นฟล็อก

10.1 ความเป็นกรด - ด่าง จะเห็นว่าการใช้สารส้มจะได้ผลดีเมื่อ pH อยู่ในช่วง 6.0 - 7.8 และที่ pH เท่าใดถึงให้ผลสูงที่สุดนั้นขึ้นกับสภาพน้ำแต่ละชนิดต้องทดสอบจึงจะทราบแน่ชัด ในโรงกรองน้ำเมื่อน้ำที่ได้ไม่ใสพอไม่ว่าสาเหตุใดก็ตาม หากมีการใส่สารส้มลงไปให้มาก เพื่อพยายามเร่งให้น้ำตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้นก็จะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น จึงไม่อยู่ในช่วง pH ที่ดีที่สุด

สำหรับการตกตะกอน

10.2 เกลือแร่ต่างๆ การมีอนุมูลซัลเฟต หรือฟอสเฟต มีผลทำให้ประสิทธิภาพการจับตัวเป็นฟล็อกเปลี่ยนแปลงไป ผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อการจับตัวเป็นฟล็อก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ ช่วง pH ที่ดีที่สุดในการเกิดฟล็อก ระยะเวลาในการเกิดฟล็อก ปริมาณที่เหมาะสมของสารเคมีช่วยตกตะกอนสำหรับการเกิดฟล็อก และปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนที่เหลือในน้ำ พวกอนุมูลประจุลบ เช่น ซัลเฟต และฟอสเฟต สามารถเปลี่ยน แปลงช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนให้กว้างขึ้นได้ เช่น ถ้าใช้สารส้ม และมีอนุมูลซัลเฟตอยู่ 125 mg/l ช่วงที่จับตัวตกตะกอนจะเป็น 5.0 - 7.8 แทน เพราะพวกอนุมูลเหล่านี้จะไปทำหน้าที่แทนอนุมูลไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากสารส้ม

10.3 ความขุ่น เกิดจากแร่ธาตุ และเศษดินต่างๆ อนุภาคเหล่านี้จะตกตะกอนได้ถ้ามีเวลาพอ การใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนจะทำให้เกิดฟล็อกง่าย และเร็ว เพียงแต่ปรับ pH ให้เหมาะสมและปฏิบัติ ดังนี้ ควรใส่สารช่วยตกตะกอนเพิ่มตามความขุ่นที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสารเคมีไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความขุ่นที่เพิ่มขึ้น และถ้ามีน้ำขุ่นมากควรใส่สารช่วยตกตะกอนเพียงเล็กน้อย เพราะโอกาสที่อนุภาคต่างๆ จะมาชนกัน และจับตัวกันมีมาก ในทำนองเดียวกันน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะจับตัวตกตะกอนได้ยากกว่า

10.4 ชนิดของสารเคมีช่วยตกตะกอน โดยปกติมักนิยมใช้สารส้ม เพราะมีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ถ้าน้ำมีสภาพค่อนข้างเป็นด่างสารส้มจะแตกตัวเกิดเป็นอลูมินेटไอออนที่ละลายน้ำได้ จึงไม่มีผลช่วยในการจับตัวเป็นฟล็อก

10.5 อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลง ความหนืดของน้ำจะเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการตกตะกอนของฟล็อกย่อมช้าลง เพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า pH ก็เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีผลในกรณีที่ใส่สารช่วยตกตะกอนไปในปริมาณต่ำ และเมื่ออุณหภูมิลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของสารเคมีในน้ำย่อมลดลงด้วย

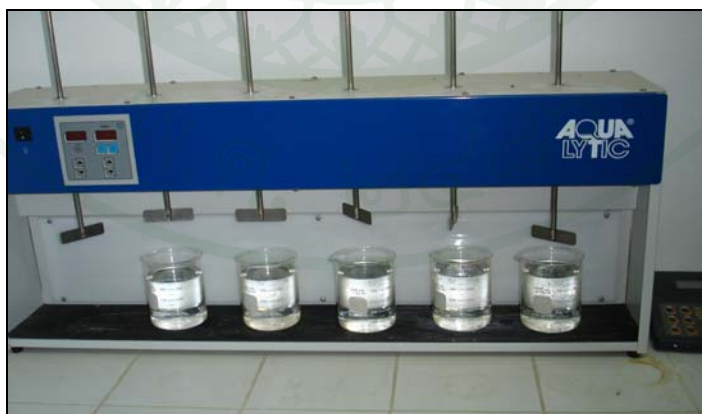
10.6 การกวน เพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในน้ำ ในตอนแรกจะเป็นการกวนเร็วในขณะที่มีการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอน เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในน้ำอย่างทั่วถึง และช่วยเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคความขุ่น และสารเคมีให้มากขึ้น โอกาสที่จะจับตัวเป็นฟล็อกก็เพิ่มขึ้น ส่วนการกวน

ช้าเพื่อให้ฟล็อกเล็กๆ ที่เกิดจากการกวนเร็วมีโอกาสชนกันเพิ่มมากขึ้น เพื่อจับตัวรวมกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่

10.7 อัตราการเกิดฟล็อก ในระยะแรกของการเกิดฟล็อก จะมีอนุภาคมานชนกันถี่มากเท่าใด อัตราการเกิดจับตัวเป็นฟล็อกก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น นอกจากจะช่วยเพิ่มจำนวนฟล็อกแล้ว ยังช่วยเพิ่มขนาด และน้ำหนักฟล็อกอีกด้วย ทำให้จมตัวได้ง่ายยิ่งขึ้น ถ้าน้ำดิบเป็นน้ำที่มีความขุ่นน้อยจะพบปัญหาว่าเกิดฟล็อกยาก และตกตะกอนช้า ปัญหานี้แก้ไขได้ โดยนำตะกอนที่ตกแล้วส่วนหนึ่ง หมุนเวียนกลับมาใช้เพื่อเพิ่มโอกาสที่อนุภาค และฟล็อกจะชนกันมากขึ้น

11. การทดลองจาร์เทสต์ (jar test)

จาร์เทสต์เป็นวิธีที่ใช้มาตั้งแต่ดั้งเดิม และปัจจุบันยังใช้อย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบอย่างง่าย โดยทำการทดลองในบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ ส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ดังภาพที่ 7 ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ และกำหนดหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบระยะเวลาการกวนน้ำ และระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่ง จึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนเป็นปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนระดับพีเอชอาจแปรเปลี่ยนหรือคงที่ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ จากนั้นก็จะได้ค่าประมาณ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดโคแอกกูเลชั่น ในการทดลองควรทำหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมยิ่งขึ้น



ภาพที่ 7 เครื่องจาร์เทสต์

12. กระบวนการ advanced oxidation processes (AOPs)

เป็นเทคโนโลยีใหม่ของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้บำบัดสารที่มีความเป็นพิษ และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยกระบวนการนี้จะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เป็น biogenic intermediates ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายต่อไป ซึ่งสารออกซิเดนต์ที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โอโซน (O_3) และรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นต้น เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในกระบวนการผลิตน้ำประปา กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำใต้ดิน กระบวนการบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดสารปนเปื้อนในดิน โดยกระบวนการออกซิเดชันนี้จะทำให้น้ำที่ย่อยสลาย หรือเปลี่ยนรูปของสารพิษต่างๆ ให้อยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ต่อไป วิธีนี้เป็นวิธีเฉพาะซึ่งพัฒนาเพื่อ

12.1 การบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดินที่มีความเข้มข้นต่ำ

12.2 ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (pre-treatment) ก่อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณไม่มาก แต่มีความเข้มข้นสูง

12.3 ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบ เป็นสารพิษที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น ไซยาไนด์และสารประกอบของโลหะหนัก เป็นต้น

12.4 ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นสุดท้าย (post-treatment) หลังจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เพื่อบำบัดสารพิษที่ยังหลงเหลืออยู่

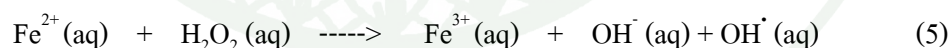
นอกจากนี้กระบวนการออกซิเดชัน ยังเป็นระบบที่สามารถใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ ได้ โดยเป็นที่ยอมรับทั้งในแง่ประสิทธิภาพ และการประเมินต้นทุนประสิทธิผล (cost effectiveness) (Martin *et al.*, 2005) กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีที่ใช้กันทั่วไปมีหลายประเภท เช่น โอโซน (ozone) รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เฟนตันรีเอเจนต์ (fenton reagent) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือใช้ร่วมกัน

13. กระบวนการเฟ้นต้น

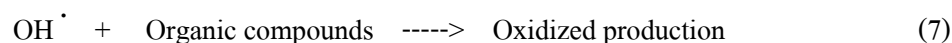
กระบวนการเฟ้นต้นถูกค้นพบครั้งแรกปี ค.ศ. 1894 จนกระทั่งปี 1930 มีการศึกษากลไกนี้ อย่างสมบูรณ์ และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสารพิษ ประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล ฟอรั้มัลดีไฮด์ สารประกอบอโรมาติก บี.ที.อี. เอ็กซ์ และสารเคมีต่างๆ ที่ได้มาจากวัสดุสีย้อม สารฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้ง กระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสีย ตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อน โดยมีผลดังนี้ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ลดค่า BOD COD กลิ่น และสี

13.1 กลไกของกระบวนการเฟ้นต้น คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของ สารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัสซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ดังปฏิกิริยาที่ (5) (Walling, 1975)

เมื่อปฏิกิริยาที่ (5) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายๆ ประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้ อนึ่งปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลของสารละลายในปฏิกิริยา (5) สามารถกระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้น เมื่อมีแสงเหนือม่วง (ultraviolet) หรือ ก๊าซโอโซน (ozone) เป็นคะตะลิสต์ (Arslan *et al.*, 2000) ปฏิกิริยาต่อมาคืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังปฏิกิริยาที่ (6)

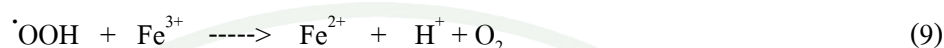


หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังปฏิกิริยาที่ (7)



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (perhydroxyl radicals)

โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังปฏิกิริยาที่ (8,9) (Walling, 1975)



อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน (ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเปอร์แมงกานेट) แต่มีความสำคัญในกระบวนการเกิดไอออนของเฟอร์รัส โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลของไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลของไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมด และให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นสุดท้าย ปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือ การควบคุมสารเคมี และพีเอช หากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำ และออกซิเจนเท่านั้น (Ghaly *et al.*, 2001)

13.2 ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) เป็นอนุมูลที่รู้จักกันดีเนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงรองจากฟลูออรีน โดยปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลไฮดรอกซิลแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

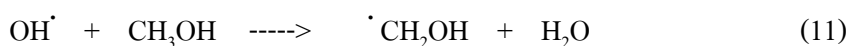
13.2.1 การรวมตัว (addition)

โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไม่อิ่มตัว อะลิฟาติก หรืออะโรมาติก แล้วให้อนุมูลของผลิตภัณฑ์ เช่น cyclohexadienyl ดังตัวอย่างในปฏิกิริยาที่ (10)



13.2.2 การสกัดไฮโดรเจน (hydrogen abstraction)

อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ และอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (organic free radical) ดังตัวอย่างในปฏิกิริยาที่ (11)



13.2.3 การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (electron transfer)

อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลเปอร์ออกไซด์ดังปฏิกิริยาที่ (12)



13.2.4 การทำปฏิกิริยาร่วมกันของอนุมูล (radical interaction)

โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (13)



ปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสถานะของปฏิกิริยาที่ถูกปรับเปลี่ยนอยู่ 2 กระบวนการคือ การสลายไฮโดรเจน และการรวมตัว ซึ่งมีผลมากกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ

จากงานวิจัยของ Chen *et al.*, 2007 กล่าวว่าไว้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นก่อนจะเข้าระบบบำบัดขั้นต่อไปที่ใช้ระบบ Fenton-Coagulation process จะมีขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ มีการปรับพีเอช การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การทำให้เป็นกลาง การสร้างตะกอน และการตกตะกอน จะมีการกำจัดสารอินทรีย์จริงๆ ในสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขั้นตอนการตกตะกอน

13.3 หน้าทีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการลดค่า BOD และ COD ในอุตสาหกรรมน้ำเสียมานานหลายปีแล้ว เนื่องจาก

13.3.1 ช่วยย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสียเบื้องต้นก่อนที่จะไปสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (เช่น สารฆ่าแมลง สารให้ความเย็น สีข้อม)

13.3.2 ช่วยบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียมากหรือน้อยในเบื้องต้นซึ่งการบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถทำได้ ก่อนที่จะมีการปล่อยออกไป

13.3.3 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ ซึ่งใช้กระบวนการลอย หรือการจมตัว

13.3.4 ช่วยทำให้การละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพในกรณีที่อุปกรณ์ให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือเกิดภาวะที่ปริมาณของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมากเกินความสามารถของระบบจะรับได้

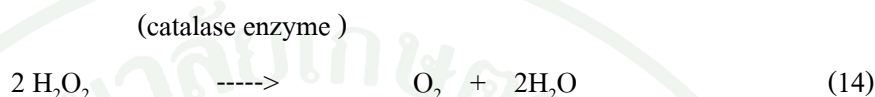
13.4 ปฏิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD แบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

13.4.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยตรง (direct chemical oxidation) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้เพียงลำพัง หรือใช้ร่วมกับคลอรีนซึ่งคลอรีนที่ได้แก่ ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+} หรือ Fe^{3+}), แสงอุลตราไวโอเลต (UV), โอโซน (O_3) และพวกแอลคาไล (alkali) ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยออกซิไดส์สารประกอบในน้ำเสียทำให้ค่า BOD หรือ COD ในน้ำเสียลดลง

13.4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกทางกายภาพ (enhanced physical separation) การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD/COD สามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ กรณีแรก การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นผลให้สารมีความเป็นขี้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัว และเกิดการตกตะกอนมากขึ้นกว่าเดิม กรณีที่ 2 เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ละลายน้ำ จะเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซออกซิเจน และน้ำ เป็นผลให้พวกไขมัน น้ำมัน และจาระบีเป็นสารไม่มีขี้จึงไม่ละลายซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นของน้ำมันเบาว่าความหนาแน่นของน้ำ เพราะฉะนั้นน้ำมันจึงลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ จึงทำให้สามารถกำจัดน้ำมันเหล่านี้ได้ง่ายขึ้น

13.4.3 การเพิ่มแหล่งผลิตออกซิเจน (supplemental oxygen source) การลดค่า BOD โดยใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะที่ต้องใช้อากาศ จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การไหลเข้าของน้ำเสีย อัตราส่วน F/M อุณหภูมิ ปริมาณสารอาหาร และความ

เข้มข้น DO การบำบัดทางชีวภาพจะง่ายขึ้นถ้ามีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อช่วยการละลายของออกซิเจนในน้ำซึ่งทำให้ค่า BOD ในน้ำลดลง แต่เราไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ร้อยเปอร์เซ็นต์เนื่องจากการไหลเข้าของน้ำ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอากาศร้อนการละลายของออกซิเจนในอากาศจะลดลง การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะช่วยเพิ่มค่า DO ซึ่งสามารถทำการวัดได้โดยตรงในระบบบำบัดทางชีวภาพ ดังปฏิกิริยาที่ (14)



BOD และ COD ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวรบกวนการวิเคราะห์ในทั้ง 2 กรณี กรณีของการวิเคราะห์ BOD ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหลือในตัวอย่างจะทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนเป็นผลให้การวัดค่า BOD ผิดพลาดได้ โดยทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง (1 mg/l H₂O เท่ากับ 0.5 mg/l DO) และสำหรับกรณีของการวิเคราะห์ COD ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมตทำให้การวิเคราะห์ค่า COD ผิดพลาดได้เช่นกัน โดยทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง

ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาโดยอาจจะพิสูจน์ได้จากการตกค้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์ของน้ำเสีย การตกค้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อาจถูกกำจัดได้โดยการเพิ่มค่า pH 7 - 10 หรือการทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายไบซัลไฟต์ (bisulfite) หรือเอนไซม์อะคาเลส เมื่อสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ในสภาวะกรดในสภาพที่มีไอออนของเหล็กอยู่ การแยกเอาไอออนของเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำที่เป็นกรดสามารถทำได้โดยวิธีการตกตะกอนในสารละลายที่มีสถานะเป็นเบส

14. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Juang *et al.* (1997) ศึกษาการใช้กระบวนการ UV/H₂O₂ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย พบว่าในช่วงของปริมาณ H₂O₂ ที่ศึกษาระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ เนื่องจากน้ำเสียมีค่าความเป็นด่างสูง แต่เมื่อระบบมีการปรับค่า pH เท่ากับ 3 การเพิ่มปริมาณ H₂O₂ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ TOC จะสูงขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณ H₂O₂ จนถึง 5,000 mg/L พบว่าสามารถบำบัดค่า COD ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้พบว่าเมื่อค่า pH ลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ TOC จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารประกอบ recalcitrant ในน้ำเสียสามารถ

ถูกทำลายจนกลายเป็น โมเลกุลอินทรีย์เล็กๆ และลดระดับในการขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ ส่วนในการทำลายสารพิษ (detoxification) ของสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นวง (spiking aromatic compounds) กระบวนการ UV/H₂O₂ จัดเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด COD และกำจัดพิษได้อย่างสมบูรณ์

Viraraghavan and Wimmer (1988) ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของสารส้ม และ PAC ที่อุณหภูมิ 7, 10 และ 20 °C พบว่าในการกำจัดความขุ่นนั้น PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 1/3 ถึง 2/3 ของปริมาณสารส้ม และ PAC สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าการใช้สารส้มร้อยละ 20 ใน ทุก ๆ อุณหภูมิที่ทดสอบซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้มีการเพิ่มสารโพลีเมอร์ เพื่อใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนและสามารถใช้ PAC ได้ในช่วงของอุณหภูมิที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม นอกจากนี้คุณสมบัติของน้ำภายหลังการบำบัดยังมีพีเอชสูงกว่าการใช้สารส้ม จึงทำให้ไม่จำเป็น ต้องปรับพีเอชของน้ำในภายหลังด้วย

Ghaly Montaser (2001) ศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบก้าวหน้าด้วยเคมีแสง (photochemical advance oxidation processes, AOPs) และปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน (photo-fenton reagent) เพื่อย่อยสลาย p-chlorophenol พบว่าปฏิกิริยาเฟนตัน (ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ H₂O₂ ที่ใช้ตัวเร่งเป็น ไอออนของเฟอร์รัส/เฟอร์ริกและคลิ่นแสงที่สภาวะเป็นกรด) เป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพมากและช่วยให้อัตราการย่อยสลายของ p-chlorophenol เพิ่มขึ้นและยังพบว่าปฏิกิริยาเฟนตันขึ้นกับ pH, ความเข้มข้นของ H₂O₂ เริ่มต้น, ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไอออนบวกของเหล็ก และชนิดของเกลือของไอออนเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของการใช้พลังงานทั้งสองกระบวนการพบว่าโฟโตเฟนตันสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการบำบัดน้อยกว่า จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของ H₂O₂ มากกว่า 0.02 mol/l และ pH มากกว่า 4 ทำให้อัตราการย่อยสลายของ p-chlorophenol ลดลง เนื่องจาก pH สูงๆ ทำให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก นอกจากนี้ถ้าเกลือของไอออนเหล็กมากเกินไปจะทำให้น้ำมีสีน้ำตาลขุ่น และทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลไฮดรอกซิล กรณีนี้อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับเหล็กแทนการจับกับสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงจำเป็น ต้องใช้อัตราส่วนระหว่าง H₂O₂ : Fe(II) ในปริมาณน้อย เพื่อหลีกเลี่ยงการรวมตัวกับอนุมูลไฮดรอกซิล และช่วยลดการเกิดตะกอนจากสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก

Satapanajaru *et al.* (2005) เป็นการกำจัดสีรีแอกทีฟ เรมาซอล คาร์บอน อาร์จีบี (RC) เรมาซอล ดีฟ เรด อาร์จีบี (RR) และเรมาซอล โกลด์ เยล โลว์ อาร์จีบี (RY) จากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดลงของสีระหว่างการใส่

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สังเคราะห์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอก ในสภาพความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอออนเฟอร์รัสที่แตกต่างกัน สภาพที่เหมาะสมของกระบวนการนี้ คือ ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนของไอออนเฟอร์รัสต่อเปอร์ออกไซด์ 1:10 ความเป็นกรดต่างที่ 3 และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสี คือ RC ร้อยละ 88 RR ร้อยละ 73 และ RY ร้อยละ 64

Badawy and Ali (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียรวมจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากชุมชนด้วยกระบวนการสร้างตะกอน และการใช้กระบวนการเฟ้นต้นในการบำบัด โดยใช้การทดลอง jar test สำหรับสารสร้างตะกอนที่ใช้ คือ FeCl_3 และสารช่วยสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ polymer, PAC และเบนโทไนต์ สภาพที่ใช้ คือ กวนเร็วที่ 400 rpm เป็นเวลา 3 นาที กวนช้า 40 rpm เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที ส่วนกระบวนการเฟ้นต้นกวนเร็วที่ 100 rpm เป็นเวลา 5 นาที กวนช้า 40 rpm เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที ผลการทดลองพบว่า การใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงขึ้น โดยเฉพาะ PAC 0.4 g/l ประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 95 ส่วนกระบวนการเฟ้นต้นที่พีเอช 3 เหล็กไอออน 400 mg/l และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 550 mg/l มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดี 100 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นรากร และคณะ (2546) เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง ของโรงงานย้อมผ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีเฟ้นต้น รีเอเจนต์ และหาสภาพที่เหมาะสมในการใช้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกำจัดเหล็ก ก่อนนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านถ่านกัมมันต์ เรซิน แลกเปลี่ยนไอออน หรือรีเวอส์ออสโมซิส ผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสม ในการบำบัดสีด้วยวิธีเฟ้นต้นรีเอเจนต์ พบว่าการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเป็น 4 สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 100 mg/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 27.5 mg/l ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ร้อยละ 92.66 แต่ปริมาณเหล็กในน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิมหลังกำจัดโดยออกซิไดซ์เหล็กด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในอัตราส่วน 1:1 ค่า pH 9.5 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดร้อยละ 98.28 และผลจากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในพารามิเตอร์อื่นๆ พบว่าน้ำหลังผ่านการกำจัดสี และเหล็กสามารถนำไปใช้เป็นน้ำล้างพื้น โรงงาน น้ำซักโครก น้ำรดต้นไม้ และสามารถนำไปใช้ใน ระบบน้ำหล่อเย็นแบบผ่านครั้งเดียว

จิราวรรณ (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์ คือ ฟีนอล และ 2,4 ไดคลอโรฟีนอล ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับกระบวนการตกตะกอนโดยวิเคราะห์การลดลงของค่า COD และสารเคมีตกค้างในน้ำและตะกอน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบ คือ COD, TOC, pH และไอออนของซัลเฟต เหล็ก แคลเซียมและปริมาณตะกอนที่ได้ ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ 1,100 และ 550 ppm กรณี 1,100 ppm ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักสารประกอบอินทรีย์ต่อไอออนเหล็กเท่ากับ 1: 0.65 และกรณีที่ 550 ppm เท่ากับ 1: 0.45 โดยทั้งสองกรณีใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 1:11.7:4.5 ผลการศึกษาพบว่าการใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับกระบวนการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์สามารถบำบัด COD ในกรณีของฟีนอล ได้ดีกว่า 2,4 ไดคลอโรฟีนอลทั้งสองอัตราส่วน กรณีสารตกค้างในน้ำและตะกอน พบว่ากรณีของฟีนอลมีปริมาณไอออนของซัลเฟตในตะกอนน้อยกว่า 2,4 ไดคลอโรฟีนอล ทั้งสองอัตราส่วน กรณีปริมาณไอออนของเหล็กตกค้างทั้งสองกรณีพบว่าปริมาณไอออนของเหล็กอยู่ในตะกอน 100% และในกรณีปริมาณไอออนของแคลเซียมตกค้างในน้ำและตะกอนพบว่า ฟีนอลมีปริมาณไอออนของแคลเซียมตกค้างในตะกอนมากกว่า 2,4 ไดคลอโรฟีนอล

โอภาส (2546) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารส้ม ปูนขาว และโพไลอะลูมิเนียมคลอไรด์ หาปริมาณและพีเอชที่เหมาะสม จากการทดลองใช้เครื่องจาร์เทสต์ ใช้อัตราการกวนเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 30 rpm เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าปริมาณสารที่เหมาะสมเท่ากับ 280, 1,100, และ 100 mg/l ตามลำดับ ส่วนค่าพีเอชของสารส้มน้ำ และ โพไลอะลูมิเนียมคลอไรด์ไม่จำเป็นต้องปรับก่อนการบำบัด ยกเว้นปูนขาวต้องปรับก่อนการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบสารสร้างตะกอนทั้งสามพบว่า โพไลอะลูมิเนียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 99.54 บีโอดีร้อยละ 88.21 ซีโอดีร้อยละ 87.63 สารแขวนลอยร้อยละ 91.60 ทีเคเอ็นร้อยละ 24.92 และ ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 94.14

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการวิจัย

- 1.1 ปีกเกอร์
- 1.2 ปีเปต
- 1.3 จุกยาง
- 1.4 นาฬิกาจับเวลา
- 1.5 เครื่องชั่งละเอียด
- 1.6 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 1.7 เครื่องจาร์เทสต์ (jar test)
- 1.8 เครื่องมือวิเคราะห์ COD
- 1.9 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 1.10 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)
- 1.11 เครื่องวัดความขุ่น (turbidity meter)
- 1.12 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (atomic absorption spectrometer, AAS)

2. สารเคมีในการวิจัย

- 2.1 hydrogen peroxide (H_2O_2)
- 2.2 ferrous sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 2.3 sodium hydroxide (NaOH)
- 2.4 sulfuric (H_2SO_4)
- 2.5 aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
- 2.6 poly aluminum chloride (PAC)
- 2.7 สารเคมีวิเคราะห์ COD
- 2.8 สารเคมีวิเคราะห์ ซัลเฟต

วิธีการ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (experimental research) โดยการนำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมาทำการบำบัดด้วยเฟนตัน และตกตะกอนด้วย aluminum sulfate และ poly aluminum chloride จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเป็นบ่อรวบรวมน้ำเสีย (equalization tank) ที่ปล่อยน้ำเสียออกมาจากกระบวนการผลิต ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. การหาสถานะที่เหมาะสมของเฟนตัน

- 1.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมทำการวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD
- 1.2 หาค่าพีเอชที่เหมาะสม
 - 1.2.1 นำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชที่ 2.00, 2.50, 3.00, 3.50 และ 4.00
 - 1.2.2 เติม ferrous sulfate และ hydrogen peroxide ในขั้นตอนการกวนเร็ว
 - 1.2.3 ทำการทดลองจาร์เจสต์ โดยกำหนดให้ ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที
 - 1.2.4 นำไปเปิดดูคูล์น้ำส่วนใส แล้วปรับพีเอชให้เป็น 7.5
 - 1.2.5 นำไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD
- 1.3 หาปริมาณ ferrous sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
 - 1.3.1 นำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชโดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 1.2
 - 1.3.2 หาปริมาณ ferrous sulfate อย่างหยาบ แล้วเติม hydrogen peroxide ในขั้นตอนการกวนเร็ว
 - 1.3.3 ทำการทดลองจาร์เจสต์ โดยกำหนดให้ ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที
 - 1.3.4 นำไปเปิดดูคูล์น้ำส่วนใส แล้วปรับพีเอชให้เป็น 7.5
 - 1.3.5 นำไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD
 - 1.3.6 หาปริมาณ ferrous sulfate อย่างละเอียด
 - 1.3.7 ทำการทดลองตามข้อ 1.3.3 - 1.3.5
- 1.4 หาปริมาณ hydrogen peroxide (H_2O_2)
 - 1.4.1 นำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชโดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากทดลองในข้อ 1.2
 - 1.4.2 เติม ferrous sulfate ที่ได้จากทดลองในข้อ 1.3

1.4.3 หาปริมาณ hydrogen peroxide โดยเป็นการวิเคราะห์อย่างหยาบ

1.4.4 ทำการทดลองจาร์เจสท์ โดยกำหนดให้ ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที

1.4.5 นำไปเปิดดูคือน้ำส่วนใส แล้วปรับพีเอชให้เป็น 7.5

1.4.6 นำไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD

1.4.7 หาปริมาณ hydrogen peroxide อย่างละเอียด

1.4.8 ทำการทดลองตามข้อ 1.4.4 - 1.4.6

1.5 หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

1.5.1 นำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชโดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากทดลองในข้อ 1.2

1.5.2 เติม ferrous sulfate ที่ได้จากทดลองในข้อ 1.3 และเติม hydrogen peroxide ที่ได้จากทดลองในข้อ 1.4 ในขั้นตอนการกวนเร็ว

1.5.3 ทำการทดลองจาร์เจสท์ โดยกำหนดให้ ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และทำการแปรผันระยะเวลาดังทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

1.5.4 นำไปเปิดดูคือน้ำส่วนใส แล้วปรับพีเอชให้เป็น 7.5

1.5.5 นำไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี COD และวิเคราะห์ดูการตกค้างของเหล็กและซัลเฟต

2. การหาสภาวะที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน คือ aluminum sulfate และ poly aluminum chloride ด้วยกระบวนการ coagulation

2.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมทำการวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD

2.2 ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 7 - 8

2.3 นำน้ำเสีย 500 ml ใส่ในบีกเกอร์ จำนวน 6 ใบสำหรับการทำจาร์เจสท์

2.4 เติมสารสร้างตะกอนในขั้นตอนการกวนเร็ว โดยเป็นการหาปริมาณสารสร้างตะกอนแบบหยาบ

2.5 ทำการทดลองจาร์เจสท์ โดยกำหนดให้ ความเร็วรอบในการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที

2.6 นำไปเปิดดูคือน้ำส่วนใส แล้วปรับพีเอชให้เป็น 7.5

2.7 นำน้ำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น และสี

2.8 เลือกปริมาณสารสร้างตะกอนแบบละเอียด โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.4 ที่ให้ค่าความขุ่น และสีน้อย มาทำการทดลอง แปรผันค่าให้ละเอียดมากขึ้น

2.9 ทำการทดลองตามข้อ 2.5

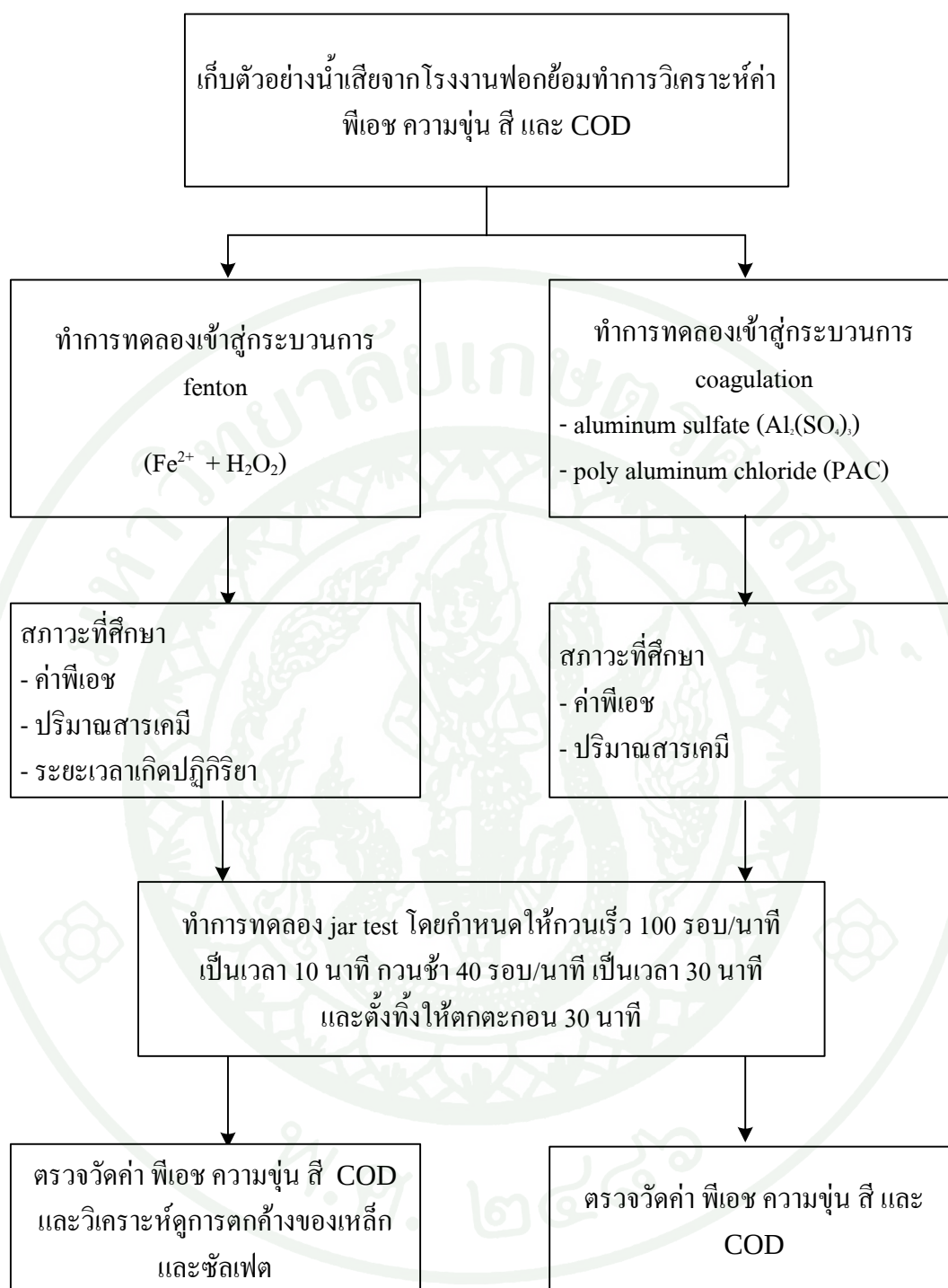
2.10 นำปิเปตดูคือน้ำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่า พีเอช ความขุ่น สี และ COD

2.11 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

Parameter	Method
COD (mg/l)	closed reflux method
color (SU)	space unit method (absorbance 400 - 700 nm)
turbid (NTU)	nephelometer method
pH	electrometric method
iron (mg/l)	atomic absorption spectrometric method
sulfate (mg/l)	turbidimetric method

หมายเหตุ การวิเคราะห์ปริมาณสารต่างๆ ดำเนินการตามมาตรฐานสำหรับวิธีการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย (standard method for the examination of water and wastewater)



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสีย

ผลและวิจารณ์

ในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำเสียจริง จากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยจุดที่ทำการเก็บตัวอย่างเป็นบ่อรวบรวมน้ำเสีย (equalization tank) ที่ปล่อยน้ำเสียออกมาจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีการใช้สีหลายประเภท เช่น สีดิสเพอร์ส สีรีแอทีฟ สีฟักเมนต์ สีแว็ต เป็นต้น นำมาทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้เฟนตัน ($\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$) และการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ผลการบำบัดสี และ COD ด้วยเฟนตัน

ทำการศึกษาสภาวะของเฟนตันโดยใช้ ferrous sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) กับ hydrogen peroxide (H_2O_2) 30% ถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ ดังนี้ ปริมาณ ferrous sulfate , ปริมาณ hydrogen peroxide, ค่าพีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องจาร์เจสต์ กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที กวนช้าที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที แปรผันปริมาณ ferrous sulfate ที่ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l ปริมาณ hydrogen peroxide ที่ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l ค่า pH ที่ 2.00, 2.50, 3.00, 3.50 และ 4.00 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลด ความขุ่น สี COD และดูการตกค้างของเหล็ก และซัลเฟตในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลอง 5 ชุดการทดลอง ผลการทดลองแสดงในตารางผนวกที่ ก1 ถึง ก36

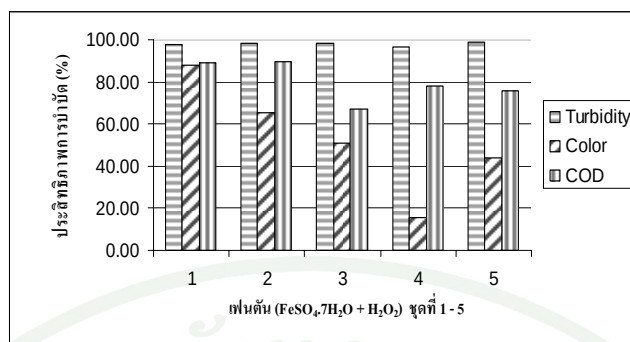
จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของเฟนตันทั้ง 5 ชุดการทดลอง พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของ COD ในช่วง 1,689.60 - 2,667.81 mg/l เหลือเท่ากับ 2,255.75 mg/l ใช้ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.80 และ 1.00 g/l เหลือเท่ากับ 0.92 g/l, ปริมาณ H_2O_2 5.50, 6.60 และ 7.70 g/l เหลือเท่ากับ 6.38 g/l, pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา 3.00, 3.50 และ 4.00 เหลือเท่ากับ 3.40 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ตั้งไว้ให้ผลดีที่สุดเท่ากับ 150 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ความขุ่น สี และ COD เหลือเท่ากับ 97.85, 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขุ่น สี และ COD เท่ากับ 0.88, 26.70 และ 9.56 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 ส่วนภาพที่ 9 จะเห็นว่าเฟนตันมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น COD และ สี ได้ดีตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดแต่ละครั้งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำเสีย ชนิดและปริมาณสีย้อม ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังการบำบัด ประสิทธิภาพ และสถานะที่เหมาะสมของเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์		ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
		1	2	3	4	5		
น้ำเสียก่อนบำบัด	pH	12.05	12.11	12.63	12.25	12.21	12.05-12.63	0.23
	Turbid (NTU)	128.00	108.00	134.00	128.00	177.00	108.00-177.00	25.46
	Color (SU)	160.60	117.00	160.30	137.30	175.10	117.00-175.10	22.91
	COD (mg/l)	2,208.48	1,689.60	2,613.60	2,667.81	2,099.24	1,689.60-2,667.81	401.59
น้ำเสียหลังบำบัด	pH	2.42	2.04	2.28	2.08	2.69	2.04-2.69	0.27
	Turbid (NTU)	2.76	2.12	2.40	4.62	2.21	2.12-2.76	1.03
	Color (SU)	19.29	40.39	78.56	121.50	98.23	19.29-121.50	41.71
	COD (mg/l)	239.68	172.80	856.80	580.03	514.08	172.80-856.80	276.14
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	Turbid (NTU)	97.84	98.04	98.21	96.39	98.75	96.39-98.75	0.88
	Color (SU)	87.99	65.48	50.99	15.80	43.90	15.80-87.99	26.70
	COD (mg/l)	89.15	89.77	67.22	78.26	75.51	67.22-89.77	9.56

ตารางที่ 3 (ต่อ)

พารามิเตอร์		ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
		1	2	3	4	5		
สถานะที่เหมาะสม หลังบำบัด	pH	3.50	3.00	3.00	3.50	4.00	3.00-4.00	0.42
	[FeSO ₄ ·7H ₂ O] (g/l)	1.00	1.00	0.80	1.00	0.80	0.80-1.00	0.11
	[H ₂ O ₂] (g/l)	6.60	5.50	6.60	7.70	5.50	5.50-7.70	0.92
	Time (min)	150	150	150	150	150	150	0.00



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) การทดลองชุดที่ 1- 5 ด้วยเฟนตัน

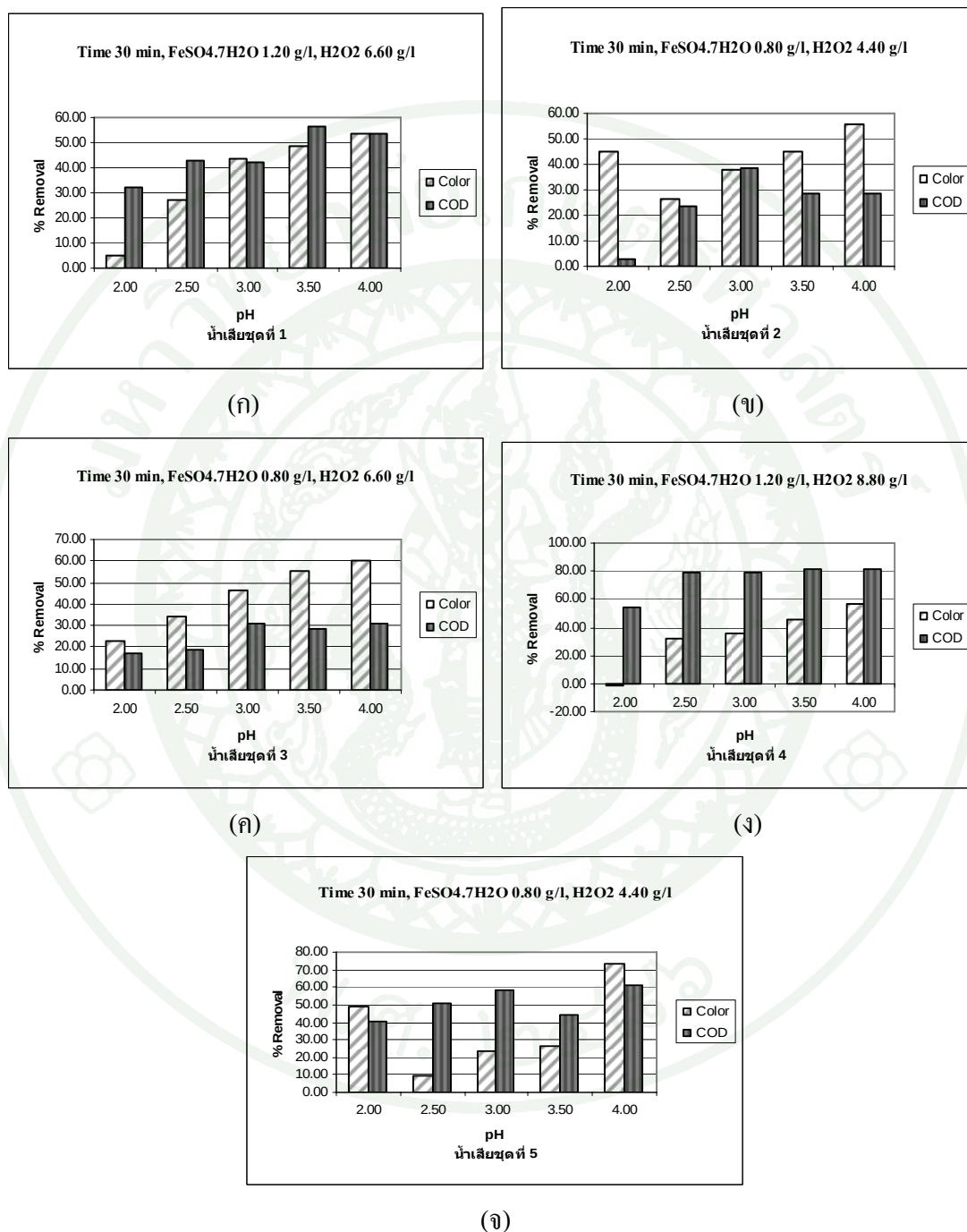
ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเฟนตัน

1. ค่าพีเอช (pH)

จากผลการทดลองแปรผันค่า pH ที่ 2.00, 2.50, 3.00, 3.50 และ 4.00 พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมจาก 5 ชุดการทดลองอยู่ในช่วง 3.00 - 4.00 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก3, ก10, ก17, ก24 และ ก31 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลองจากภาพที่ 10 (ง) และตารางผนวกที่ ก24 จะเห็นว่ามีประสิทธิภาพ ในการบำบัด COD สูงสุดเท่ากับ 81.11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับ 56.59 เปอร์เซ็นต์ และ จากภาพที่ 10 (ข) และตารางผนวกที่ ก10 มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ต่ำสุดเท่ากับ 2.84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับ 45.00 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองจะเห็นว่าค่า pH มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตัน โดยค่า pH น้ำดิบอยู่ในช่วง 12.05 ถึง 2.63 ซึ่งมีความเป็นด่างสูงต้องทำการปรับ pH ด้วยกรดซัลฟูริก 1 นอร์มัลให้อยู่ในช่วง 2 ถึง 4 โดยค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความเป็นกรดที่ 3 - 4 ที่ค่า pH ต่ำกว่า หรือสูงกว่านี้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดทั้งสี และ COD จะไม่เหมาะสม อันเนื่องมาจากที่ pH ต่ำๆ จะถูกรบกวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเฟอร์รัสไอออน โดยปฏิกิริยาระหว่าง เฟอร์รัสไอออน กับ H₂O₂ จะถูกยับยั้ง และ H₂O₂ เปลี่ยนสภาพอยู่ในรูป H₃O₂⁺ (Bautista *et al.*, 2006) ส่วนที่ pH สูงๆ ดังภาพผนวกที่ 1 เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออนเป็นเฟอร์ริกไอออนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเกิดได้ไม่เต็มที่

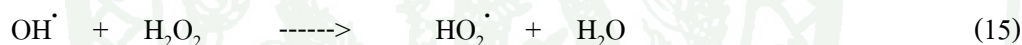
(Satapanajaru *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2005; พวงรัตน์ และนรา, 2548) และนอกจากนี้ที่ pH สูงๆ H_2O_2 จะเกิดการสลายตัวให้ออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ง่ายดังสมการที่ (14) (ธีระดา, 2541)



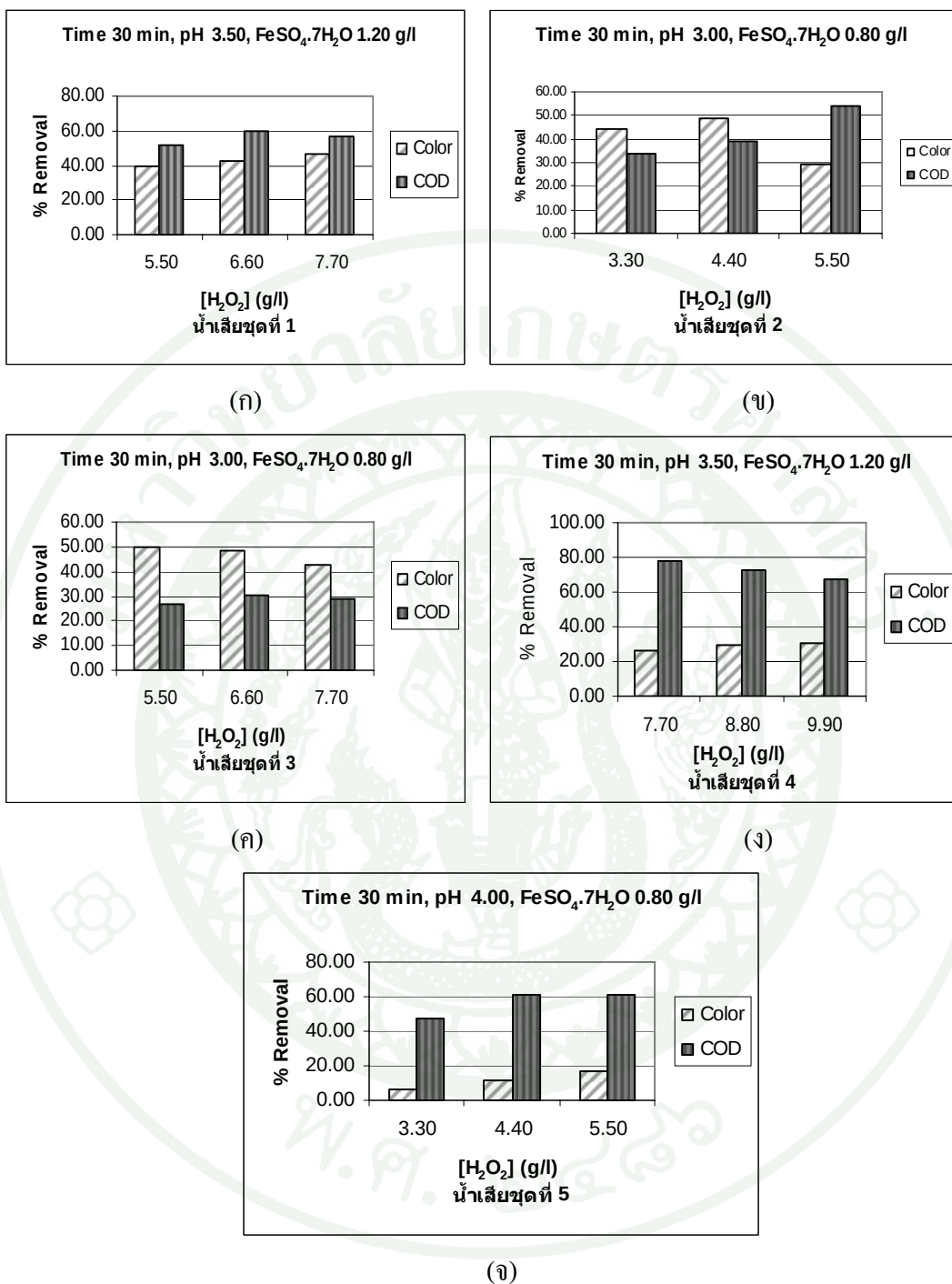
ภาพที่ 10 ผลของค่า pH (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1 - 5

2. ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

จากผลการทดลองแปรผันปริมาณ H_2O_2 ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าใช้ H_2O_2 ในช่วง 5.50 - 7.70 g/1 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก4, ก11, ก18, ก25 และ ก32 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลอง จะเห็นว่าจากภาพที่ 11 (ง) และตารางผนวกที่ ก25 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD สูงสุดเท่ากับ 78.41 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพที่ 11 (ค) และตารางผนวกที่ ก18 ให้ประสิทธิภาพการบำบัด COD ต่ำสุดเท่ากับ 26.72 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพที่ 11 (ก, ข, ค และ จ) เมื่อเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอนุมูลไฮดรอกซิล($OH^\cdot$) ที่เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Satapanajaru *et al.*, 2005; พงษ์รัตน์ และนรา, 2548) แต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 11 (ง) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 ถึงจุดๆ หนึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดจะไม่เพิ่มขึ้นอีก อันเนื่องมาจากอนุมูล $OH^\cdot$ ที่เพิ่มมากขึ้นจะไปจับตัวกับ H_2O_2 เองได้ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($HO_2^\cdot$) ซึ่งเพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูล $OH^\cdot$ ได้ออกซิเจน และน้ำในขั้นสุดท้าย แสดงดังปฏิกิริยาที่ (15) และ (16) (Neyens, 2003)



ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีของภาพที่ 11 (ง และ ค) เท่ากับ 26.58 และ 49.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ ก25 และ ก18) จะเห็นว่า การบำบัดสีของเฟนตันจะช่วยลดปริมาณสีลงจากเดิม และโทษของน้ำเสียที่ผ่านเฟนตัน จะมีสีออกเหลืองอันเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณเหล็กที่ยังตกค้างในกระบวนการ จากภาพที่ 11 (ก, ข, ง และ จ) ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ H_2O_2 เพิ่มขึ้น (Satapanajaru *et al.*, 2005) แต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 11 (ค) เมื่อ H_2O_2 เกินสภาวะที่สมดุลประสิทธิภาพจะลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากเพอร์รัสไฮไดรอกซิลเปลี่ยนเป็นเพอร์ไฮไดรอกซิลหลังจากทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 ส่งผลให้สีบางส่วนกลับคืนมา

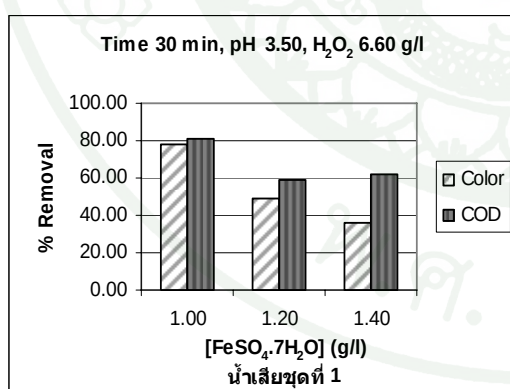


ภาพที่ 11 ผลของ H₂O₂ (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1-5

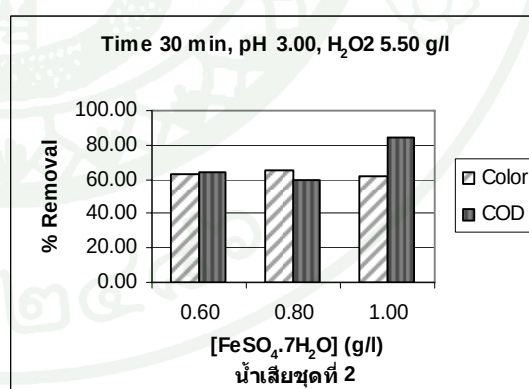
3. ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

จากผลการทดลองแปรผันปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าต้องใช้ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในช่วง 0.80 - 1.00 g/l ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก4, ก12, ก19, ก26 และ ก33 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลองจากภาพที่ 12 (ข) และตารางผนวกที่ ก12 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD สูงสุดเท่ากับ 84.66 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพที่ 12 (ง) และตารางผนวกที่ ก26 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุดเท่ากับ 15.32 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 12 (ข, ค และ จ) เมื่อเพิ่มปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด COD เนื่องจากการเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ลงไปทำให้ OH^- เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (5) ทำให้เกิดการย่อยสลายสาร อินทรีย์ในน้ำเสีย (Martins *et al.*, 2005; พวงรัตน์ และนรา, 2548) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ มากเกินไป (ภาพที่ 12 ก และ ง) ประสิทธิภาพจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณ H_2O_2 จะลดลง ทำให้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่มากเกินไปไม่มีตัวเข้าทำปฏิกิริยาให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในการบำบัดน้ำเสีย

ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีของภาพที่ 12 (ข และ ง) เท่ากับ 61.38 และ 32.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ ก12 และ ก26) จากภาพที่ 12 (ก ถึง จ) จะเห็นว่าแนวโน้มของการบำบัดสีเมื่อปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เนื่องจากเฟอร์รัสไอออนเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไอออน หลังจากทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 ส่งผลให้สีบางส่วนกลับคืนมา

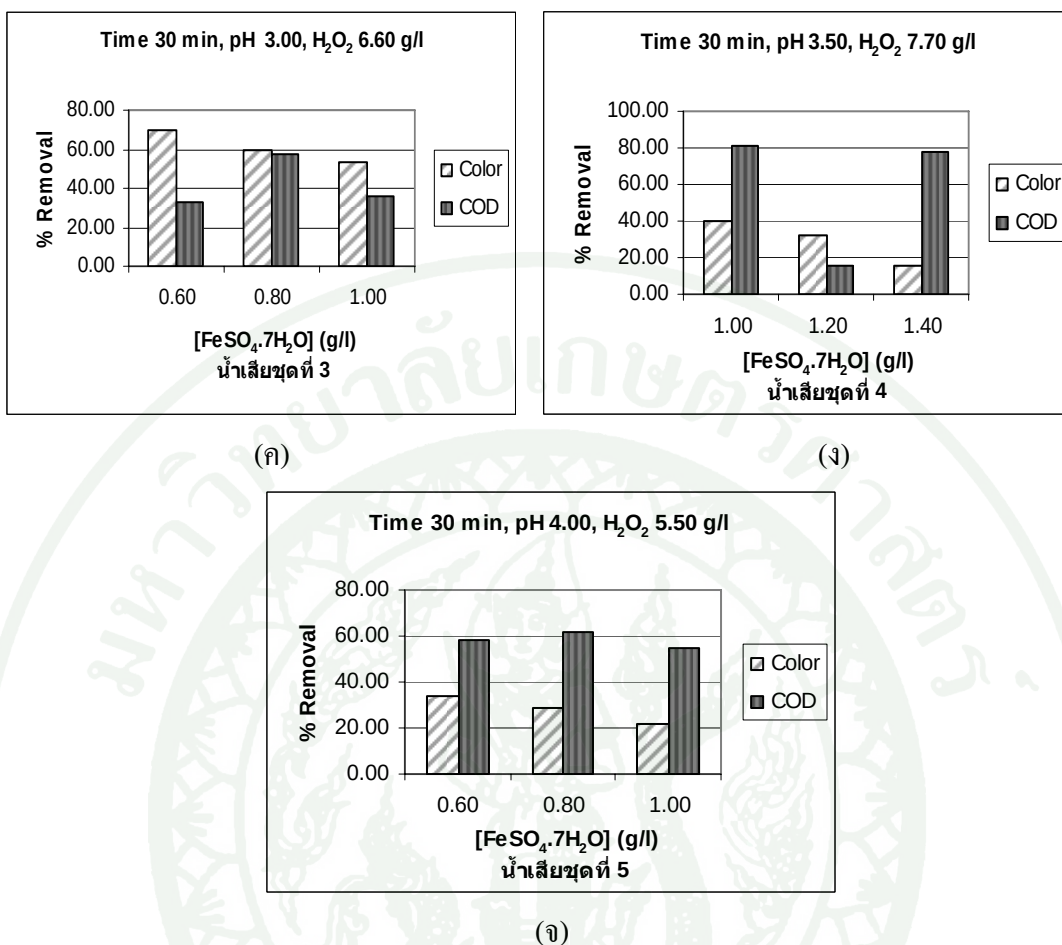


(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 ผลของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่

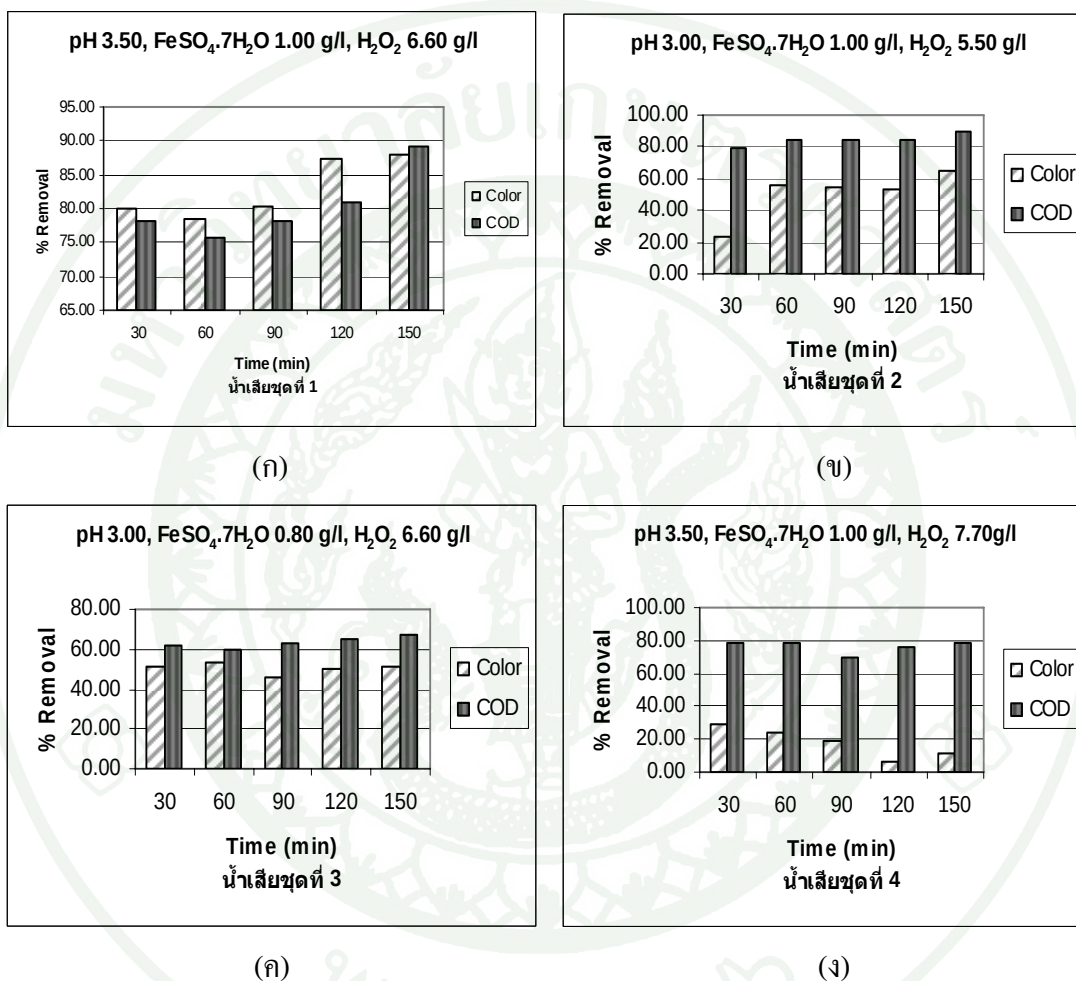


ภาพที่ 12 (ต่อ)

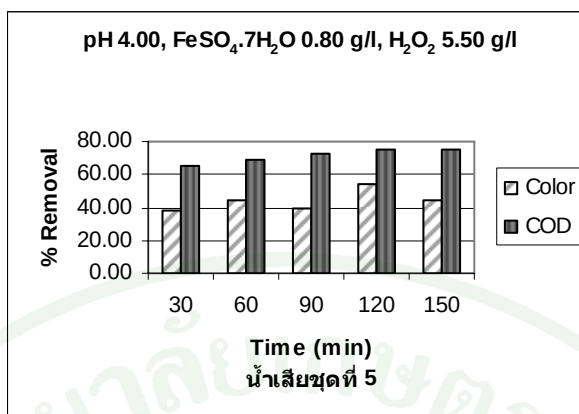
4. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time)

จากผลการทดลองแปรผันระยะเวลาที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก6, ก13, ก20, ก27 และ ก34 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมจาก 5 ชุดการทดลองเท่ากับระยะเวลาสูงสุดที่ตั้งไว้ คือ 150 นาที จากภาพที่ 13 (ข) และตารางผนวกที่ ก13 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD สูงสุดเท่ากับ 89.77 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับ 65.48 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 150 นาที และภาพที่ 13 (ค) และตารางผนวกที่ ก20 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ต่ำสุดเท่ากับ 59.50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับ 53.11 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 60 นาที

จากการทดลองจะเห็นว่าที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD แสดงว่าระยะเวลามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน อันเนื่องมาจากที่ระยะ เวลามากขึ้น อนุมูลไฮดรอกซิลมีเวลาจับตัวกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 13 ผลของระยะเวลา (ก - ง) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของข้อมูลน้ำเสียชุดที่ 1 - 5

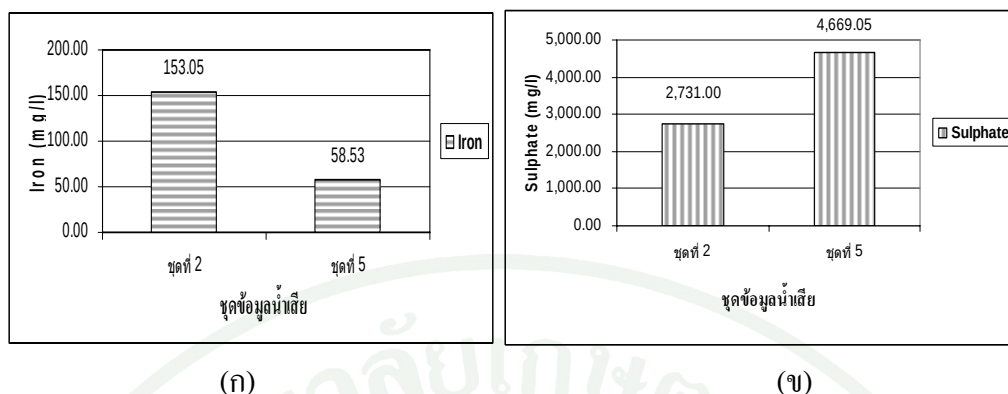


(จ)

ภาพที่ 13 (ต่อ)

5. ปริมาณเหล็ก และซัลเฟตตกค้าง

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก และซัลเฟตที่ตกค้างหลังจากปฏิกิริยาเฟนตัน ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก37 โดยนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันชุดที่ 2 และชุดที่ 5 ไปวิเคราะห์ได้ความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 14 พบว่ามีการตกค้างจริงของเหล็ก และซัลเฟตที่ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันแล้ว 300 มิลลิลิตร โดยน้ำเสียชุดที่ 2 ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 1.00 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50 g/l มีปริมาณสารตกค้างของเหล็ก 153.05 mg/l และซัลเฟต 2,731.00 mg/l และน้ำเสียชุดที่ 2 ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.80 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50 g/l มีปริมาณสารตกค้างของเหล็ก 58.53 mg/l และซัลเฟต 4,669.05 mg/l จะเห็นว่าปริมาณเหล็กที่ตกค้างจะแปรผันตรงกับปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่ใช้ในการทดลอง คือ เมื่อปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเพิ่มขึ้น ปริมาณเหล็กตกค้างจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนปริมาณซัลเฟตมีปริมาณลดลงเมื่อปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ปริมาณเหล็ก (ก) และ ซัลเฟต (ข) ตกค้างหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันชุดที่ 2 และ 5

ผลการบำบัดสี และ COD ด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอน และ pH ที่เหมาะสม โดยทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ หาค่าพีเอชที่เหมาะสมแบบละเอียด และหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด โดยใช้เครื่องจาร์เทส กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที กวนช้าที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที แปรผันปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l และค่า pH ที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 โดยทำการทดลอง 5 ชุดการทดลอง ผลการทดลองแสดงในตารางผนวกที่ ก38 ถึง ก58

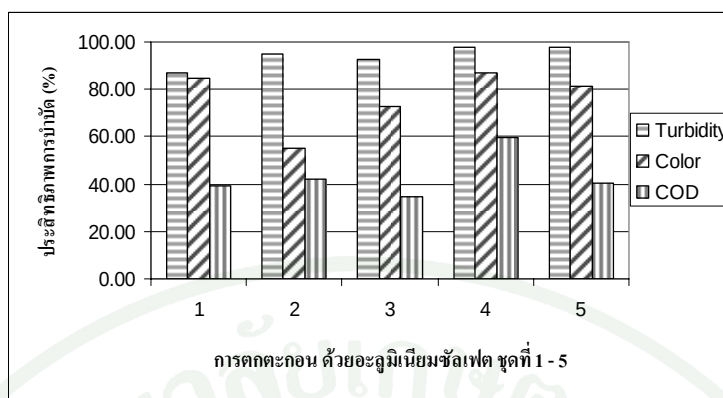
จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของ COD ในช่วง 2,099.24 - 3,277.12 mg/l ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,713.23 mg/l ใช้ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต 0.80 - 5.00 g/l เฉลี่ยเท่ากับ 2.56 g/l และ ค่า pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ 7.00 และ 7.50 เฉลี่ยเท่ากับ 7.20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 94.02, 76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขุ่น สี และ COD เท่ากับ 4.46, 12.96 และ 9.62 ตามลำดับ จากภาพที่ 15 จะเห็นว่าอะลูมิเนียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD ได้ดีตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดแต่ละครั้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ ชนิดและปริมาณสีย้อม ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน
พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์		ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
		1	2	3	4	5		
น้ำเสียก่อนบำบัด	pH	12.76	12.21	12.50	12.25	12.21	12.21-12.76	0.24
	Turbid (NTU)	134.00	197.00	135.00	128.00	177.00	128.00-197.00	30.88
	Color (SU)	141.30	190.50	143.40	137.30	175.10	137.30-190.50	23.81
	COD (mg/l)	3,277.12	2,987.60	2,534.40	2,667.81	2,099.24	2,099.24-3,277.12	448.41
น้ำเสียหลังบำบัด	pH	4.58	4.04	5.32	1.80	1.82	1.80-5.32	1.62
	Turbid (NTU)	17.50	9.84	9.72	2.99	4.05	2.99-17.50	5.79
	Color (SU)	21.75	85.40	38.73	17.56	32.54	17.56-85.40	27.17
	COD (mg/l)	1,999.20	1,738.24	1,663.20	1,082.05	1,256.64	1,082.05-1,999.20	372.51
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	Turbid (NTU)	86.94	95.01	92.80	97.66	97.71	86.94-97.71	4.46
	Color (SU)	84.61	55.17	72.99	87.21	81.42	55.17-87.21	12.96
	COD (mg/l)	39.00	41.82	34.38	59.44	40.14	34.38-59.44	9.62

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สถานะที่	หมายเลข	พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
			1	2	3	4	5		
หลังบำบัด	เหมาะสม	pH	7.00	7.00	7.00	7.50	7.50	7.00-7.50	0.27
		[Al ₂ (SO ₄) ₃] (g/l)	5.00	2.40	0.80	2.20	2.40	0.80-5.00	1.52



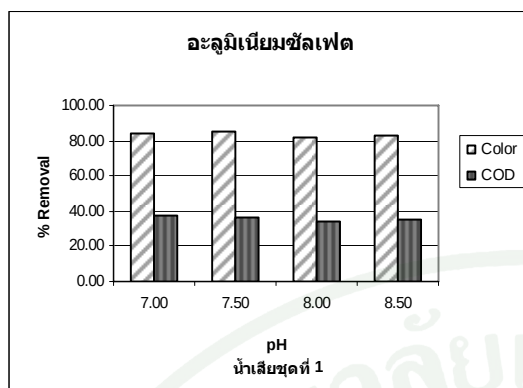
ภาพที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) การทดลองชุดที่ 1 - 5 โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต

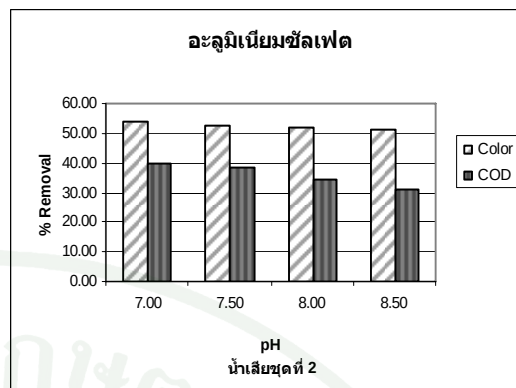
1. ค่าพีเอช (pH)

จากการทดลองแปรผันค่า pH พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 และ 7.50 ซึ่งอยู่ในช่วงค่า pH ที่เป็นกลาง (โอภาส, 2546) ผลการทดลองหาค่า pH อย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก39, ก43, ก47, ก51 และ ก55 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลอง ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ที่สูงสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 4 (ภาพที่ 16 (ง)) และตารางผนวกที่ ก51 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 86.80 และ 55.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ต่ำสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 3 (ภาพที่ 16 (ค)) และตารางผนวกที่ ก47 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 63.17 และ 24.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากภาพที่ 16 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีดีกว่า COD

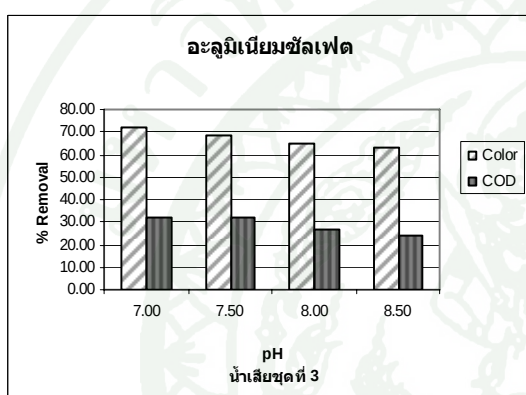
ดังนั้นค่า pH ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี จากภาพที่ 16 จะเห็นว่าที่ pH สูงหรือต่ำกว่านี้แนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง และกรณีที่มีการเติมสารสร้างตะกอนมากเกินไปน้ำหลังบำบัดจะมีสภาพเป็นกรด และเกิดตะกอนมากขึ้น



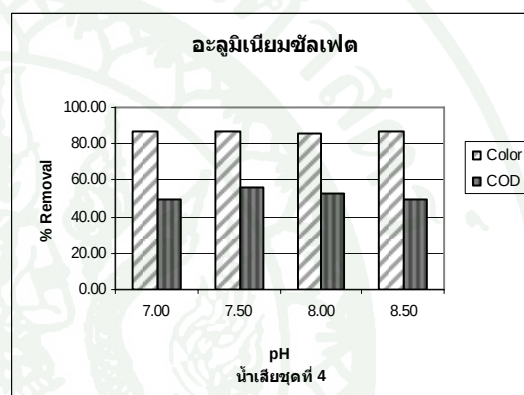
(ก)



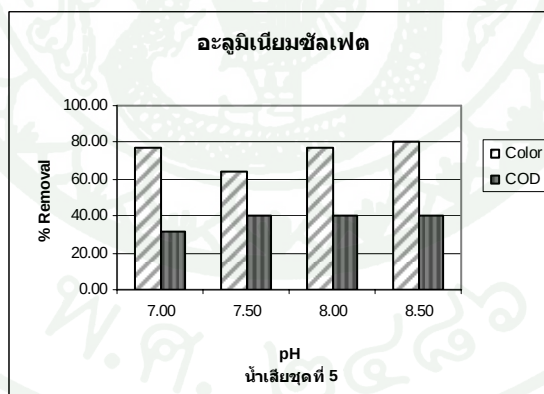
(ข)



(ค)



(ง)



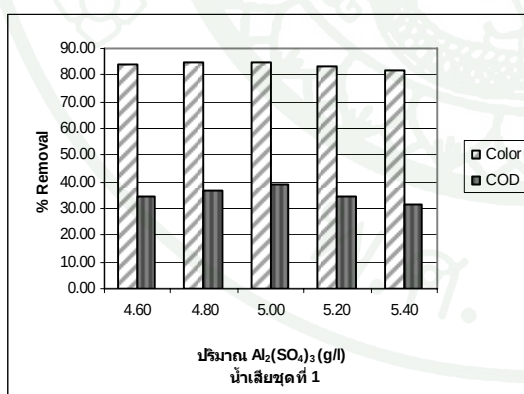
(จ)

ภาพที่ 16 ผลของค่า pH (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1-5

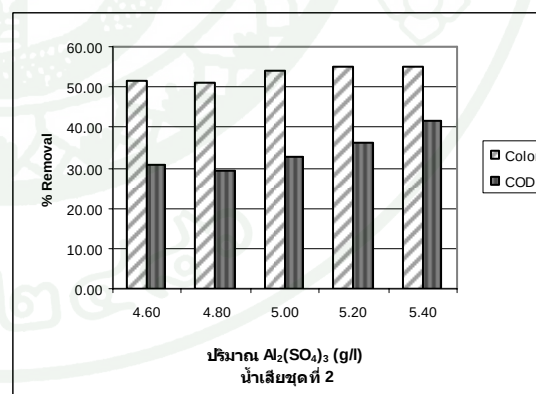
2. ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต

จากการทดลองแปรผันปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.80 - 5.00 g/l ผลการทดลองหาปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก40, ก44, ก48, ก52 และ ก56 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลอง ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 4 (ภาพที่ 17 (ง)) และตารางผนวกที่ ก52 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 87.21 และ 59.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุดในชุดการทดลองที่ 3 (ภาพที่ 17 (ค)) และตารางผนวกที่ ก48 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 39.74 และ 18.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี และ COD โดยจากภาพที่ 16 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเติมสารสร้างตะกอน ช่วยไปทำลายแรงผลักดันระหว่างอนุภาคของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากขึ้นเกิดการจับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเกิดการตกตะกอน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนถึงจุดๆ หนึ่ง ประสิทธิภาพการบำบัดจะไม่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอิออนประจุบวกของสารเคมีที่แตกตัวจะไปเกาะที่ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคเกิดแรงผลักแยกออกจากกันแทนที่จะจับตัวกัน

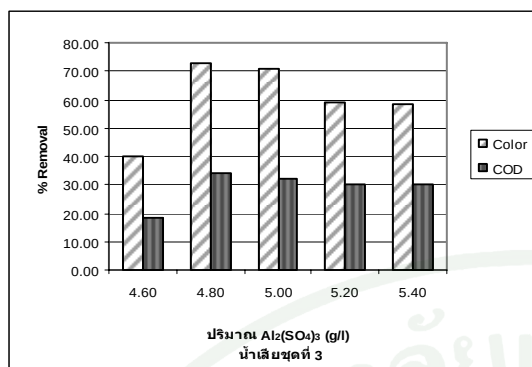


(ก)

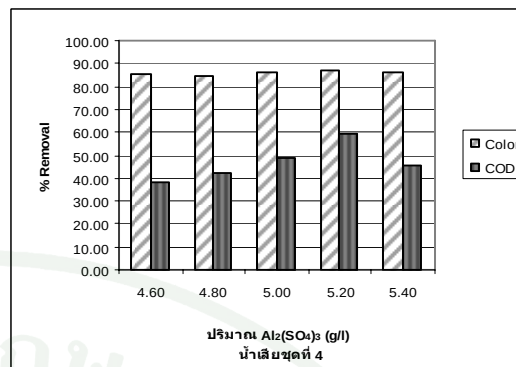


(ง)

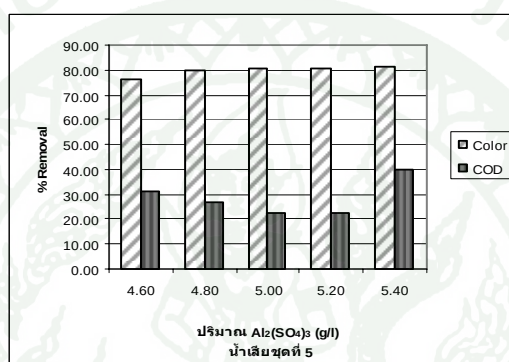
ภาพที่ 17 ผลของอะลูมิเนียมซัลเฟต (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1 – 5



(ก)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 17 (ต่อ)

ผลการบำบัดสี และ COD ด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอน และ pH ที่เหมาะสม โดยทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ หาค่า pH ที่เหมาะสมแบบละเอียด และหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด โดยใช้เครื่องจาร์เทสต์ กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที กวนช้าที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที แปรผันปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l และค่า pH ที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 โดยทำการทดลอง 5 ชุดการทดลอง ผลการทดลองแสดงในตารางผนวกที่ ก58 ถึง ก79

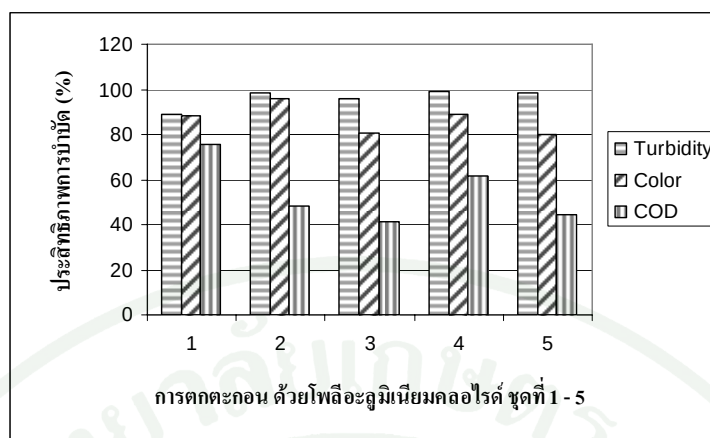
จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของ COD ในช่วง 2,099.24 - 3,277.12 mg/l ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,575.07 mg/l ใช้ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 3.00 - 5.20 g/l เฉลี่ยเท่ากับ 4.00 g/l และ ค่า pH ที่เหมาะสมในการเกิด ปฏิกิริยาที่ 7.00, 7.50 และ 8.00 เฉลี่ยเท่ากับ 7.40 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 96.12, 86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขุ่น สี และ COD เท่ากับ 4.37, 6.75 และ 14.26 ตามลำดับ จากภาพที่ 18 จะเห็นว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการบำบัด ความขุ่น สี และ COD ได้ดีตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดแต่ละครั้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ ชนิด และปริมาณสีย้อม ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์		ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
		1	2	3	4	5		
น้ำเสียก่อนบำบัด	pH	12.76	12.15	12.50	12.25	12.21	12.15-12.76	0.25
	Turbid (NTU)	134.00	115.00	135.00	128.00	177.00	115.00-177.00	23.32
	Color (SU)	141.30	102.50	143.40	137.30	175.10	102.50-175.10	25.78
	COD (mg/l)	3,277.12	2,296.80	2,534.40	2,667.81	2,099.24	2,099.24-3,277.12	449.16
น้ำเสียหลังบำบัด	pH	6.19	6.42	6.27	6.24	3.13	3.13-6.42	1.41
	Turbid (NTU)	15.20	1.85	5.68	1.15	2.35	1.15-15.20	5.83
	Color (SU)	16.42	3.98	28.12	15.20	35.15	3.98-35.15	12.12
	COD (mg/l)	800.00	1,188.00	1,490.40	1,026.08	1,168.88	800.00-1,490.40	252.17
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	Turbid (NTU)	88.66	98.39	95.79	99.10	98.67	88.66-99.10	4.37
	Color (SU)	88.38	96.12	80.39	88.93	79.93	79.93-96.12	6.75
	COD (mg/l)	75.59	48.28	41.19	61.54	44.32	41.19-75.59	14.26

ตารางที่ 5 (ต่อ)

พารามิเตอร์			ชุดการทดลอง					ช่วงค่า	±S.D.
			1	2	3	4	5		
สภาวะที่ เหมาะสม หลังบำบัด	pH		7.50	7.00	7.50	8.00	7.00	7.00-8.00	0.42
	[PAC] (g/l)		5.20	3.00	4.20	4.20	3.40	3.00-5.20	0.85



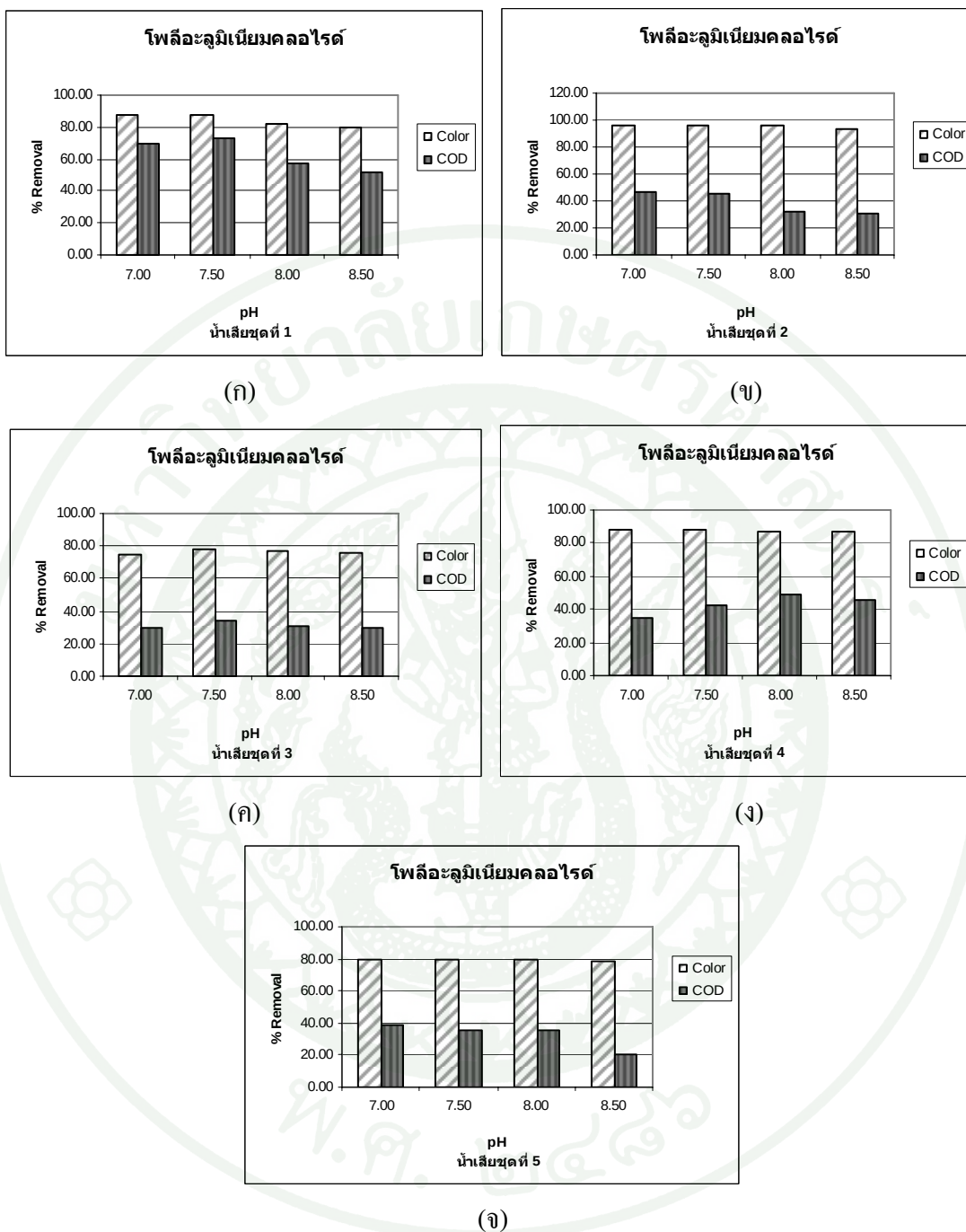
ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) ของการทดลอง ชุดที่ 1- 5 โดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน

ปัจจัยที่มีผลกระทบท่อการตกตะกอนด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

1. ค่าพีเอช (pH)

จากการทดลองแปรผันค่า pH พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00, 7.50 และ 8.00 ซึ่งอยู่ในช่วงค่า pH ที่เป็นกลาง (โอภาส, 2546) ผลการทดลองหาค่าพีเอชอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก60, ก64, ก68, ก72 และ ก76 โดยในการบำบัดทั้ง 5 ชุดการทดลอง ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 1 (ภาพที่ 19 (ก)) และตารางผนวกที่ ก60 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 87.37 และ 72.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุดในชุดการทดลองที่ 5 (ภาพที่ 19 (จ)) และตารางผนวกที่ ก76 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 77.96 และ 20.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากภาพที่ 19 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสี ดีกว่า COD

ดังนั้นค่า pH ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี จากภาพที่ 19 จะเห็นว่าที่ pH สูงหรือต่ำกว่านี้แนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง และกรณีที่มีการเติมสารสร้างตะกอนมากเกินไปน้ำหลังบำบัดจะมีสภาพเป็นกรด และเกิดตะกอนมากขึ้น เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมซัลเฟต แต่ค่า pH หลังบำบัดมีความเป็นกรดน้อยกว่า

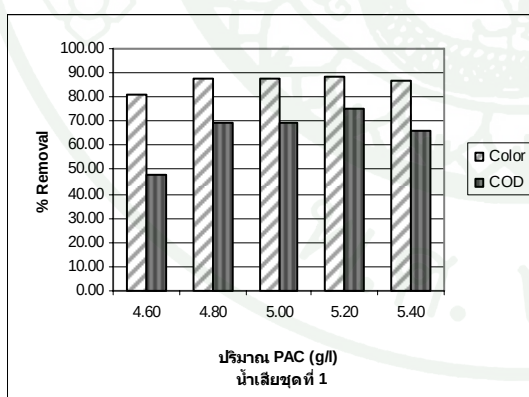


ภาพที่ 19 ผลของค่า pH (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1 - 5

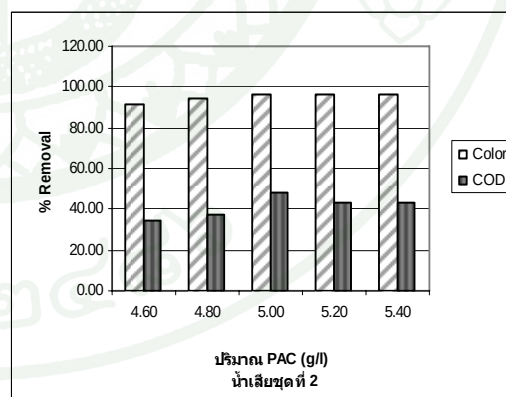
2. ปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์

จากการทดลองแปรผันปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 g/l ผลการทดลองหาปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์อย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก61, ก65, ก69, ก73 และ ก77 ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 1 (ภาพที่ 20 (ก)) และตารางผนวกที่ ก61 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 88.38 และ 75.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุดอยู่ในชุดการทดลองที่ 3 (ภาพที่ 20 (จ)) และตารางผนวกที่ ก77 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 79.39 และ 22.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพิ่มปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี และ COD โดยจากภาพที่ 20 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นคล้ายกับการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตซึ่งได้อธิบายไปดังข้างต้น อันเนื่อง มาจากการเติมสารสร้างตะกอน ช่วยไปทำลายแรงผลักระหว่างอนุภาคของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากขึ้นเกิดการจับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเกิดการตกตะกอน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนถึงจุดๆหนึ่งประสิทธิภาพการบำบัดจะไม่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอิออนประจุบวกของสารเคมีที่แตกตัวจะไปเกาะที่ผิวของอนุภาคทำให้อนุภาคเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคแทนที่จะจับตัวกัน

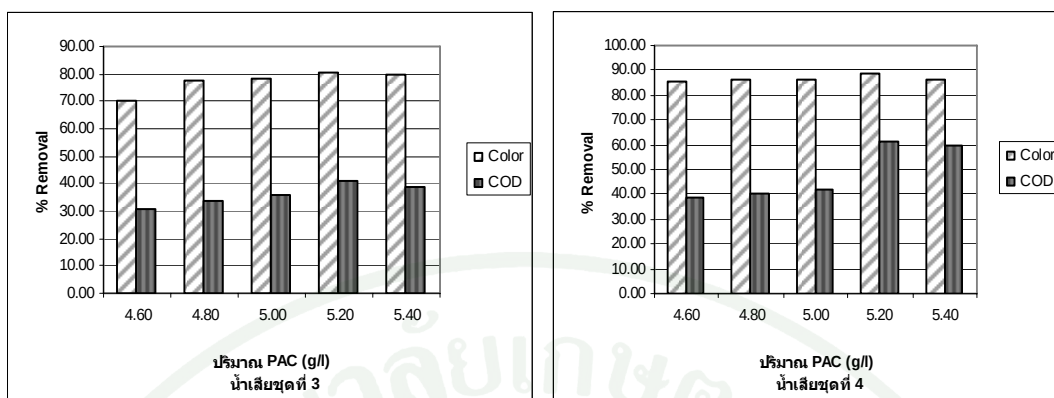


(ก)



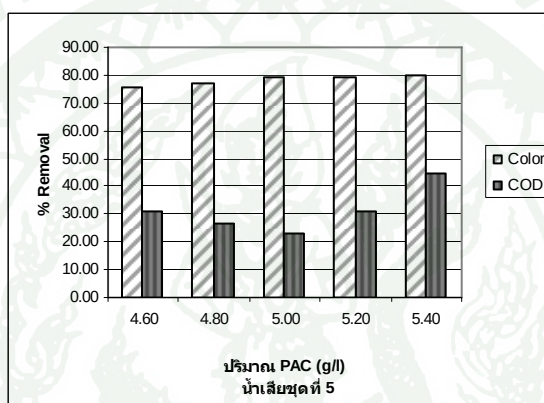
(ข)

ภาพที่ 20 ผลของโพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ (ก - จ) ที่มีผลต่อการลดลงของสี และ COD ของการทดลองชุดที่ 1 - 5



(ก)

(ง)



(จ)

ภาพที่ 20 (ต่อ)

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

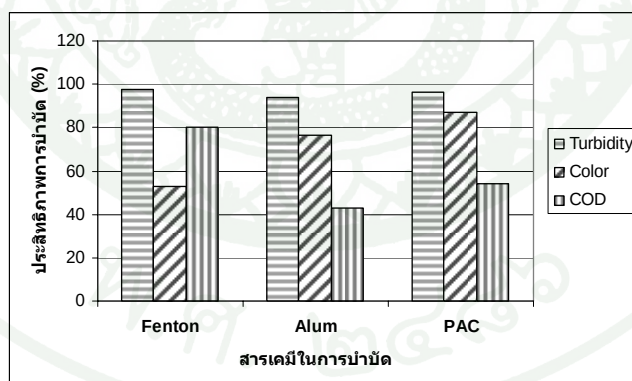
จากการทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมี ดังตารางที่ 6 และภาพที่ 21 พบว่าเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD เท่ากับ 79.98, 42.96 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการบำบัดสีเท่ากับ 52.83, 76.28 และ 86.75 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ดีที่สุด รองลงมาคือ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมซัลเฟต ส่วนสีโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดีที่สุด รองลงมาคือ อะลูมิเนียมซัลเฟต และเฟนตัน ดังแสดงในภาคผนวก ข ลักษณะตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าเฟนตันจะเกิดการตกตะกอนเร็วสุด รองลงมา คือ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมซัลเฟต ตามลำดับ จาก

ภาพที่ 22 จะเห็นว่าเฟนตันเกิดตะกอนที่ก้นบีกเกอร์น้อยที่สุด ส่วนอะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ถ้าเทียบในปริมาณสารเคมีที่เท่ากัน โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะเกิดตะกอนน้อยกว่าอะลูมิเนียมซัลเฟต

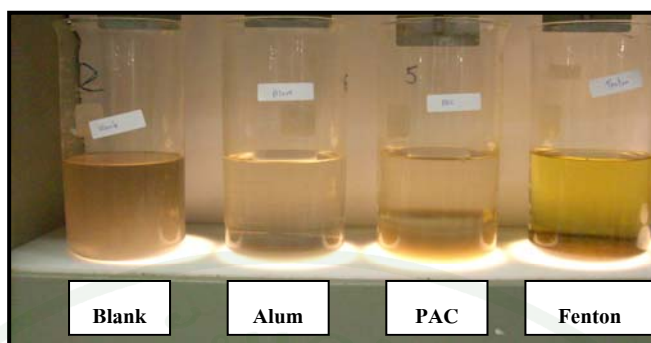
เมื่อเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้สารเคมีกับระบบบำบัดแบบชีวภาพที่มีอยู่เดิมพบว่าระบบชีวภาพยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกว่า แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์สูงสามารถใช้ระบบบำบัดด้วยสารเคมี เป็น pre-treatment ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้ดียิ่งขึ้น หรือใช้เป็น post-treatment บำบัดสารอินทรีย์และสีที่ยังตกค้างอยู่ หรือสารอินทรีย์ และสีที่บำบัดด้วยระบบชีวภาพได้ยาก

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	Fenton	Alum	PAC
Turbid (NTU)	97.85	94.02	96.12
Color (SU)	52.83	76.28	86.75
COD (mg/l)	79.98	42.96	54.18



ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพการบำบัดของเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์



ภาพที่ 22 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า เฟนตัน และอะลูมิเนียมซัลเฟตต้องทำการปรับค่า pH ทั้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาดูดซับฟลูรีก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีสภาพค่อนข้างเป็นด่างที่ pH ประมาณ 12 และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วน้ำเสียมีสภาพเป็นกรด ต้องทำการปรับสภาพให้เป็นกลางที่ pH ประมาณ 7.5 ส่วนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ทำการปรับสภาพเฉพาะก่อนเกิดปฏิกิริยา ส่วนหลังเกิดปฏิกิริยาไม่ต้องปรับสภาพเพราะน้ำเสียมีค่า pH ที่เป็นกลางอยู่แล้ว (Viraraghavan and Wimmer, 1988) ปริมาณสารที่ใช้แสดงดังตารางที่ 7 โดยเฟนตันใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, เฟอรัสซัลเฟต, กรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6.38, 0.92, 0.79 และ 0.53 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ตามลำดับ อะลูมิเนียมซัลเฟตใช้สารสร้างตะกอน, กรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.56, 0.46, 0.34 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ตามลำดับ และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้สารสร้างตะกอน และกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 4.00 และ 0.44 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย

ตารางที่ 7 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

สารเคมี *	ปริมาณสารเคมีต่อน้ำเสีย (kg/ m ³ น้ำเสีย)		
	Fenton	Alum	PAC
hydrogen peroxide	6.38	-	-

ตารางที่ 7 (ต่อ)

สารเคมี *	ปริมาณสารเคมีต่อน้ำเสีย (kg/ m ³ น้ำเสีย)		
	Fenton	Alum	PAC
ferrous sulfate	0.92	-	-
aluminum sulfate	-	2.56	-
poly aluminum chloride (30%)	-	-	4.00
sulfuric (98%)	0.79	0.46	0.44
sodium hydroxide	0.53	0.34	-

หมายเหตุ * สารเคมีชนิด commercial grade

ราคาสารเคมี และค่าใช้จ่ายรวมแสดงดังตารางที่ 8 พบว่า เฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต้องเสียค่าใช้จ่ายเท่ากับ 125.32, 25.79 และ 83.15 บาท/ลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ตามลำดับ (วิธีการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค) ซึ่งจะเห็นว่าเฟนตันจะใช้สารเคมีมากที่สุดดังตารางที่ 8 ทั้งสารที่ใช้ทำปฏิกิริยา และสารที่ใช้ปรับค่า pH น้ำเสีย จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดแต่ก็ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ดีที่สุด ส่วนอะลูมิเนียมซัลเฟตใช้สารเคมีสามชนิด แต่ราคาสารเคมีสำหรับสร้างตะกอนถูกสุด ดังนั้นค่าใช้จ่ายจึงถูกสุด และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ใช้สารเคมีแค่สองชนิดไม่ต้องปรับสภาพ pH หลังบำบัด แต่ค่าใช้จ่ายสูงกว่าอะลูมิเนียมซัลเฟต เนื่องจากราคาสารเคมีแสดงดังตารางที่ 8 ของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์แพงกว่าอะลูมิเนียมซัลเฟตถึง 12.33 บาทต่อกิโลกรัม และปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้มากกว่าด้วย

ตารางที่ 8 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโรงงาน พิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน)

สารเคมี	ราคา	ราคาสารเคมีต่อน้ำเสีย			เกรด
	สารเคมี	(บาท/ m ³ น้ำเสีย)			
	(บาท/kg)	Fenton	Alum	PAC	
hydrogen peroxide	17.00	108.46	-	-	commercial
ferrous sulfate	9.00	8.28	-	-	grade

ตารางที่ 8 (ต่อ)

สารเคมี	ราคา	ราคาสารเคมีต่อน้ำเสีย			เกรด
	สารเคมี	(บาท/ m ³ น้ำเสีย)			
	(บาท/kg)	Fenton	Alum	PAC	
aluminum sulfate	8.00	-	20.48	-	commercial grade
poly aluminum chloride (30%)	20.33	-	-	81.32	
sulfuric (98%)	4.16	3.30	1.91	1.83	
sodium hydroxide	10.00	5.28	3.40	-	
รวมค่าใช้จ่าย (บาท/ m ³ น้ำเสีย)		125.32	25.79	83.15	-

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีจากโรงงานฟอกย้อม ประเภทน้ำเสียรวม โดยใช้เฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพตัสเซียมเปอร์คลอเรต พบว่าสารอินทรีย์และสีมีปริมาณลดลงโดยเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมเฉลี่ยที่ pH 3.40, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.92 g/l, H_2O_2 6.38 g/l และระยะเวลาที่ตั้งไว้สูงสุดที่ 150 นาที ได้ผลดีที่สุด อะลูมิเนียมซัลเฟตให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมเฉลี่ยที่ pH 7.20 และปริมาณสารสร้างตะกอน 2.56 g/l และโพตัสเซียมเปอร์คลอเรตให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และ COD เท่ากับ 86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมเฉลี่ยที่ pH 7.40 และปริมาณสารสร้างตะกอน 4.00 g/l

จากการทดลองจะเห็นว่าเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ดีที่สุด รองลงมา คือ โพตัสเซียมเปอร์คลอเรต และอะลูมิเนียมซัลเฟต ตามลำดับ ส่วนการบำบัดสีโพตัสเซียมเปอร์คลอเรต ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดีที่สุด รองลงมา คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต และเฟนตัน ตามลำดับ

สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำบัดพบว่าเฟนตัน และอะลูมิเนียมซัลเฟต ต้องทำการปรับ pH ทั้งก่อนและหลังการทดลอง ส่วนโพตัสเซียมเปอร์คลอเรตปรับ pH เฉพาะก่อนการทดลอง โดยค่าใช้จ่ายรวมของสารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH และสารสร้างตะกอนของ เฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพตัสเซียมเปอร์คลอเรตเท่ากับ 125.32, 25.79 และ 83.15 บาท/ลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น เช่น โอโซน และยูวี ร่วมกับเฟนตัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ และสี
2. ควรมีการศึกษาถึงวิธีการกำจัดสารตกค้างของเหล็ก และซัลเฟต หลังจากผ่านกระบวนการเฟนตัน รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นด้วย
3. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบหาสารสร้างตะกอนตัวอื่นที่มีประสิทธิภาพ และราคาถูกกว่า เพื่อช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย
4. ควรมีการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนทดลอง และผลของกระบวนการเฟนตันต่อค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) เพิ่มเติมด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2549. **เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 4. วิชาลการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

จิราวรรณ ศรีโสม. 2546. **การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอน: วิเคราะห์การลดลงของค่า COD และสารเคมีตกค้างในน้ำและตะกอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธีระดา ไสลำเพาะ. 2541. **การลดค่าซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตยาปฏิชีวนะโดยเฟนตอนรีเอเจนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นราพร หาญจนวงศ์, ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ และ พิไลวรรณ ท่อสุวรรณ. 2546. การปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังการบำบัดของโรงงานย้อมผ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร** 26(1): 17-33.

พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. **กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (flocculation)**. การประปานครหลวง. แหล่งที่มา: http://www.mwa.co.th/ewt/mwa_internew/download/gov03/2552/a_coagulation.pdf, 22 เมษายน 2551.

พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล และ นรา โตแยม. 2548. ผลของปฏิกิริยาเฟนตันที่มีต่อหมู่ฟังก์ชันนอลของอนิลิน และไนโตรเบนซีนในการบำบัดน้ำเสีย, น. 80-85. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10**. วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ชลบุรี.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2538. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

_____ และ มันรักย์ ตันทุลเวศ. 2545. **เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. **คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม**. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

โอภาส แสงทองประกาย. 2546. **การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการสร้างตะกอนทางเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

APHA and AWWA. 1995. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C.

Arslan I., I.A. Balcioglu and D.W. Bahnemann. 2000. Advanced chemical oxidation of reactive dyes in simulated dyedhouse effluents by Ferrioxalate-Fenton/UV-A and TiO₂/UV-A processes. **Dyes and Pigments** 47: 207-218.

Badawy, M.I. and M.E.M. Ali. 2006. Fenton's peroxidation and coagulation process for the treatment of combined industrial and domestic wastewater. **Journal of Hazardous Materials** B136: 961-966.

Bautista, P., A.F.M., M.A.G., J.A. Casas and J.J. Rodriguez. 2006. Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials** B138: 112-120.

Chen, S., D. Sun and JS. Chung. 2007. Treatment of pesticide wastewater by moving-bed Biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pretreatment. **Journal of Hazardous Materials** 144: 577-584.

- Ghaly, M.Y., H. Georg, M. Roland and H. Roland. 2001. Photochemical oxidation of p-chlorophenol by UV/H₂O₂ and photo-Fenton process. **Waste Management** 21: 24-47.
- Juang, L.C., D.H. Tseng and S.C. Yang. 1997. Treatment of Petrochemical Wastewater by UV/H₂O₂ Photodecomposed System. **Wat. Sci Tech** 35(12): 375-365.
- Martins, A.F., T.G. Vasconcelos and M.L. Wilde. 2005. Influence of variables of the combined Coagulation-Fenton-Sedimentation process in the treatment of trifluraline effluent. **Journal of Hazardous Materials** B127: 111-119.
- Neyens, E., and J. Baeyens. 2003. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. **Journal of Hazardous Materials** 98: 33-50.
- Peroxide Application.** Specializing in Hydrogen Peroxide for Environmental and Industrial Applications. Available Source: www.h2o2.com/application/industrial, April 20, 2008.
- Satapanajaru, T., J. Mahujchariyawong and P. Anurakpongsatorn. 2005. Reusing Wastewater from Bleaching Process of Textile Industry for Decolorization by Fenton's Oxidation. **Thai Environmental Engineering Journal** 19(1): 67-80.
- Schrank, S.G., H.J. Jose, R.F.P.M. Moreira and H.Fr. Schroder. 2004. Applicability of Fenton and H₂O₂/UV reactions in the treatment of tannery wastewater. **Chemosphere** 60: 644-655.
- Virarrahavan, T. and C. H. Wimmer. 1988. Polyaluminium Chloride as an Alternative to Alum Coagulation a Case Study. **J. Agua** 6: 316-321.
- Walling C. 1975. Fenton's reagent revisited. **Acc. Chem. Res.** 8: 125-131.





ภาคผนวก ก

ตารางแสดงการทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

กระบวนการเฟ้นต้น

ข้อมูลชุดที่ 1

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบหยาบ สภาวะที่ใช้กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที 10 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที 30 นาที ระยะเวลาตกตะกอน 30 นาที pH 3.00 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 1.00 g/l และใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 6.60 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก1

หาปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.60 g/l และใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l พบว่าปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 1.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก2

หาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.60 g/l เฟอร์รัสซัลเฟต 1.20 g/l และที่พีเอชเท่ากับ 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 และ 4.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 3.50 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก3

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.50 เฟอร์รัสซัลเฟต 1.20 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50, 6.60 และ 7.70 g/l พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 6.60 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก4

หาปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.50 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.60 g/l และเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 1.00, 1.20 และ 1.40 g/l พบว่าปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 1.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก5

หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่พีเอช 3.50 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.60 g/l เฟอร์รัสซัลเฟต 1.00 g/l และระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก6

ตารางผนวกที่ ก1 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	น้ำเสียหลังการบำบัด				
			ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l				
			2.20	4.40	6.60	8.80	11.00
pH	-	12.05	2.72	2.68	2.64	2.51	2.42
Turbidity	NTU	128.0	16.8	14.8	11.4	12.5	13.7
Color	SU	160.60	129.80	106.40	98.76	86.41	85.63

ตารางผนวกที่ ก2 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	น้ำเสียหลังการบำบัด				
			ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) g/l				
			0.10	0.40	0.80	1.20	1.60
pH	-	12.05	2.95	2.64	2.38	2.31	2.26
Turbidity	NTU	128.0	35.1	22.4	16.9	11.1	18.7
Color	SU	160.60	20.27	30.39	75.61	96.49	125.40

ตารางผนวกที่ ก3 น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเฟนตัน

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pH	-	12.05	1.48	2.26	2.39	2.78	3.06	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	12.4	11.8	11.1	10.9	11.4	90.31	90.78	91.33	91.48	91.09
Color	SU	160.60	152.10	116.80	90.46	82.53	74.29	5.29	27.27	43.67	48.61	53.74
COD	mg/l	2,208.48	1,498.00	1,258.32	1,284.00	958.72	1,018.64	32.17	43.02	41.86	56.59	53.88

ตารางผนวกที่ ก4 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l								
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)					
			5.50	6.60	7.70	5.50	6.60	7.70			
pH	-	12.05	2.98	2.95	2.84	-	-	-			
Turbidity	NTU	128.0	18.5	10.20	12.4	85.55	92.03	90.31			
Color	SU	160.60	96.72	92.14	86.53	39.78	42.63	46.12			
COD	mg/l	2,208.48	1,078.56	898.80	958.72	51.16	59.30	56.59			

ตารางผนวกที่ ก5 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			1.00	1.20	1.40	1.00	1.20	1.40
pH	-	12.05	2.97	2.93	2.87	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	3.55	4.86	4.78	97.23	96.20	96.27
Color	SU	160.60	35.11	82.13	102.50	78.14	48.86	36.18
COD	mg/l	2,208.48	419.44	898.80	838.88	81.01	59.30	62.02

ตารางผนวกที่ ก6 น้ำเสียชุดที่ 1 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ระยะเวลา (นาที)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
pH	-	12.05	2.80	2.72	2.59	2.48	2.42	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	3.65	4.86	3.75	3.10	2.76	97.15	96.20	97.07	97.58	97.84
Color	SU	160.60	32.18	34.56	31.81	20.40	19.29	79.96	78.48	80.19	87.30	87.99
COD	mg/l	2,208.48	479.36	539.28	479.36	419.44	239.68	78.29	75.58	78.29	81.01	89.15

ตารางผนวกที่ ก7 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1 โดยเฟ้นต้นที่ระยะ
เวลา 150 นาที (pH 3.50, H_2O_2 6.60 g/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.00 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
pH	-	12.05	2.42	-
Turbidity	NTU	128.0	2.76	97.84
Color	SU	160.60	19.29	87.99
COD	mg/l	2,208.48	239.68	89.15

ข้อมูลชุดที่ 2

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 เฟอรัสซัลเฟต 1.00 g/l และที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 4.40 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก8

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 4.40 g/l และเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก9

หาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4.40 g/l ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และพีเอชเท่ากับ 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 และ 4.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 3.00 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก10

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.00 เฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3.30, 4.40 และ 5.50 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 5.50 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก11

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 5.50 g/l และเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 0.60, 0.80 และ 1.00 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟต

ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 1.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก12

หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50 g/l เฟอรัสซัลเฟต 1.00 g/l และระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก13

ตารางผนวกที่ ก8 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l				
		ก่อนการบำบัด	2.20	4.40	6.60	8.80	11.00
pH	-	12.11	2.76	2.64	2.62	2.42	2.38
Turbidity	NTU	108.0	7.49	6.82	6.83	6.93	6.87
Color	SU	117.00	116.40	108.12	101.63	92.46	84.32

ตารางผนวกที่ ก9 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) g/l				
		ก่อนการบำบัด	0.10	0.40	0.80	1.20	1.60
pH	-	12.11	2.98	2.73	2.43	2.44	2.31
Turbidity	NTU	108.0	9.36	8.14	5.83	6.74	7.39
Color	SU	117.00	19.46	33.27	72.43	98.52	124.20

ตารางผนวกที่ ก10 น้ำเสียชุดที่ 2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเฟนตัน

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pH	-	12.11	1.68	2.19	2.48	2.91	3.15	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	108.0	7.94	5.89	5.48	6.12	6.75	92.65	94.55	94.93	94.33	93.75
Color	SU	117.00	64.35	86.18	72.36	64.59	52.16	45.00	26.34	38.15	44.79	55.42
COD	mg/l	1,689.60	1,641.60	1,296.00	1,036.80	1,209.60	1,209.60	2.84	23.30	38.64	28.41	28.41

ตารางผนวกที่ ก11 น้ำเสียชุดที่ 2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂) g/l								
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)					
			3.30	4.40	5.50	3.30	4.40	5.50			
pH	-	12.11	2.35	2.32	2.29	-	-	-			
Turbidity	NTU	108.0	7.84	5.46	6.93	92.74	94.94	93.58			
Color	SU	117.00	65.23	60.12	82.34	44.25	48.62	29.62			
COD	mg/l	1,689.60	1,123.20	1,036.80	777.60	33.52	38.64	53.98			

ตารางผนวกที่ ก12 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			0.60	0.80	1.00	0.60	0.80	1.00
pH	-	12.11	2.62	2.65	2.38	-	-	-
Turbidity	NTU	108.0	5.18	4.65	3.98	95.20	95.69	96.31
Color	SU	117.00	42.86	40.62	45.18	63.37	65.28	61.38
COD	mg/l	1,689.60	604.80	691.20	259.20	64.20	59.09	84.66

ตารางผนวกที่ ก13 น้ำเสียชุดที่ 2 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ระยะเวลา (นาที)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
pH	-	12.11	2.29	2.14	2.12	2.08	2.04	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	108.0	3.99	3.84	3.51	2.38	2.12	96.31	96.44	96.75	97.80	98.04
Color	SU	117.00	89.10	51.20	52.82	55.35	40.39	23.85	56.24	54.85	52.69	65.48
COD	mg/l	1,689.60	345.60	259.20	259.20	259.20	172.80	79.55	84.66	84.66	84.66	89.77

ตารางผนวกที่ ก14 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 2 โดยเฟ้นต้นที่ระยะ เวลา 150 นาที (pH 3.00, H_2O_2 5.50 g/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.00 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.11	2.04	-
Turbidity	NTU	108.0	2.12	98.04
Color	SU	117.00	40.39	65.48
COD	mg/l	1,689.60	172.80	89.77

ข้อมูลชุดที่ 3

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 เฟอรัสซัลเฟต 1.00 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 6.60 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก15

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.60 g/l และเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก16

หาพีเอชที่เหมาะสม ที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.60 g/l เฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และพีเอชเท่ากับ 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 และ 4.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 3 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก17

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3 เฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50 , 6.60 และ 7.70 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 6.60 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก18

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.60 g/l และเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 0.60, 0.80 และ 1.00 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟตที่

เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก19

หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.60 g/l เฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก20

ตารางผนวกที่ ก15 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l				
		ก่อนการบำบัด	2.20	4.40	6.60	8.80	11.00
pH	-	12.63	2.69	2.58	2.32	2.25	2.23
Turbidity	NTU	134.0	13.6	12.4	10.8	11.6	10.9
Color	SU	160.30	148.10	123.50	106.47	98.12	93.65

ตารางผนวกที่ ก16 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) g/l				
		ก่อนการบำบัด	0.10	0.40	0.80	1.20	1.60
pH	-	12.63	2.89	2.46	2.28	2.22	2.10
Turbidity	NTU	134.0	16.4	12.3	8.14	10.6	11.37
Color	SU	160.30	22.34	42.83	92.24	115.4	162.30

ตารางผนวกที่ ก17 น้ำเสียชุดที่ 3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเฟนตัน

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pH	-	12.63	1.32	2.28	2.37	2.59	3.26	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	15.3	10.8	7.64	8.46	8.95	88.58	91.94	94.30	93.69	93.32
Color	SU	160.30	123.60	105.60	86.32	72.19	63.43	22.89	34.12	46.15	54.97	60.43
COD	mg/l	2,613.60	2,167.2	2,116.80	1,814.40	1,864.80	1,814.40	17.08	19.01	30.58	28.65	30.58

ตารางผนวกที่ ก18 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l								
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)					
			5.50	6.60	7.70	5.50	6.60	7.70			
pH	-	12.63	2.55	2.52	2.48	-	-	-			
Turbidity	NTU	134.0	6.83	6.52	9.45	94.90	95.13	92.95			
Color	SU	160.30	80.56	82.14	92.43	49.74	48.76	42.34			
COD	mg/l	2,613.60	1,915.20	1,814.40	1,864.80	26.72	30.58	28.65			

ตารางผนวกที่ ก19 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			0.60	0.80	1.00	0.60	0.80	1.00
pH	-	12.63	2.75	2.56	2.42	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	6.15	3.24	5.17	95.41	97.58	96.14
Color	SU	160.30	47.89	65.71	74.62	70.12	59.01	53.45
COD	mg/l	2,613.60	1,764.00	1,108.80	1,663.20	32.51	57.58	36.36

ตารางผนวกที่ ก20 น้ำเสียชุดที่ 3 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ระยะเวลา (นาที)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
pH	-	12.63	2.52	2.48	2.36	2.31	2.28	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	3.32	3.14	3.25	2.86	2.40	97.52	97.66	97.57	97.87	98.21
Color	SU	160.30	77.52	75.16	86.45	80.15	78.56	51.64	53.11	46.07	50.00	50.99
COD	mg/l	2,613.60	1,008.00	1,058.40	957.60	907.20	856.80	61.43	59.50	63.36	65.29	67.22

ตารางผนวกที่ ก21 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 3 โดยเฟ้นต้นที่ระยะ
เวลา 150 นาที (pH 3.00, H_2O_2 6.60 g/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.80 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.63	2.28	-
Turbidity	NTU	134.0	2.40	98.21
Color	SU	160.30	78.56	50.99
COD	mg/l	2,613.60	856.80	67.22

ข้อมูลชุดที่ 4

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 เฟอรัสซัลเฟต 1.00 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 8.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก22

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 8.80 g/l และที่ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 1.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก23

หาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8.80 g/l เฟอรัสซัลเฟต 1.20 g/l และพีเอชเท่ากับ 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 และ 4.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 3.50 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก24

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.50 เฟอรัสซัลเฟต 1.20 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7.70, 8.80 และ 9.90 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 7.70 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก25

หาปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 3.50 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 7.70 g/l และเฟอรัสซัลเฟตเท่ากับ 1.00, 1.20 และ 1.40 g/l พบว่าเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 1.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก26

หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่พีเอช 3.50 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 7.70 g/l เฟอรัสซัลเฟต 1.00 g/l และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก27

ตารางผนวกที่ ก22 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂) g/l				
			2.20	4.40	6.60	8.80	11.00
pH	-	12.25	2.78	2.50	2.34	2.28	2.28
Turbidity	NTU	128.0	10.76	11.53	11.64	9.36	10.87
Color	SU	137.30	135.70	145.70	98.37	70.21	61.51

ตารางผนวกที่ ก23 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l				
			0.10	0.40	0.80	1.20	1.60
pH	-	12.25	3.11	2.82	2.36	2.35	2.30
Turbidity	NTU	128.0	14.9	12.1	9.25	8.67	10.34
Color	SU	137.30	22.66	35.73	76.44	103.30	135.90

ตารางผนวกที่ ก24 น้ำเสียชุดที่ 4 ค่าพีเอชที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pH	-	12.25	1.36	2.14	2.35	2.98	3.42	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	15.82	12.08	9.10	8.48	8.60	87.64	90.56	92.89	93.38	93.28
Color	SU	137.30	139.70	93.45	88.25	73.91	59.60	-1.75	31.94	35.72	46.17	56.59
COD	mg/l	2,667.81	1,224.00	576.00	576.00	504.00	504.00	54.12	78.41	78.41	81.11	81.11

ตารางผนวกที่ ก25 น้ำเสียชุดที่ 4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			7.70	8.80	9.90	7.70	8.80	9.90
pH	-	12.25	2.17	2.13	2.09	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	6.02	6.37	8.40	95.30	95.02	93.44
Color	SU	137.30	100.8	96.90	95.08	26.58	29.42	30.75
COD	mg/l	2,667.81	576.00	720.00	864.00	78.41	73.01	67.61

ตารางผนวกที่ ก26 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			1.00	1.20	1.40	1.00	1.20	1.40
pH	-	12.25	2.31	2.26	2.19	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	5.18	6.63	4.17	95.95	94.82	96.74
Color	SU	137.30	82.76	92.64	116.50	39.72	32.53	15.15
COD	mg/l	2,667.81	503.71	2,259.07	580.03	81.12	15.32	78.26

ตารางผนวกที่ ก27 น้ำเสียชุดที่ 4 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ระยะเวลา (นาที)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
pH	-	12.25	2.26	2.23	2.17	2.11	2.08	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	6.33	7.98	10.4	7.15	4.62	95.05	93.77	91.88	94.41	96.39
Color	SU	137.30	97.14	104.60	111.70	128.30	115.61	29.25	23.82	18.65	6.55	15.80
COD	mg/l	2,667.81	580.03	580.03	808.99	656.35	580.03	78.26	78.26	69.68	75.40	78.26

ตารางผนวกที่ ก28 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 4 โดยเฟ้นต้นที่ระยะ เวลา 150 นาที (pH 3.50, H_2O_2 7.70 g/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.00 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.25	2.08	-
Turbidity	NTU	128.0	4.62	96.39
Color	SU	137.30	121.50	15.80
COD	mg/l	2,667.81	580.03	78.26

ข้อมูลชุดที่ 5

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 เฟอร์รัสซัลเฟต 1.00 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.20, 4.40, 6.60, 8.80 และ 11.00 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 4.40 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก29

หาปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอช 3.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 4.40 g/l และเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 0.10, 0.40, 0.80, 1.20 และ 1.60 g/l พบว่าเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก30

หาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4.40 g/l เฟอร์รัสซัลเฟต 0.80 g/l และพีเอชเท่ากับ 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 และ 4.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 4.00 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก31

หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 4.00 เฟอร์รัสซัลเฟต 0.80 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3.30, 4.40 และ 5.50 g/l พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 5.50 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก32

หาปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอช 4.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 5.50 g/l และเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 0.60, 0.80 และ 1.00 g/l พบว่าเฟอร์รัสซัลเฟต

ที่เหมาะสมแบบละเอียดเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก33

หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่พีเอช 4.00 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5.50 g/l เฟอรัสซัลเฟต 0.80 g/l และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก34

ตารางผนวกที่ ก29 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l				
		ก่อนการบำบัด	2.20	4.40	6.60	8.80	11.00
pH	-	12.21	2.66	2.46	2.19	2.20	2.21
Turbidity	NTU	177.0	2.75	1.34	1.45	1.68	1.58
Color	SU	175.10	144.00	159.90	98.82	71.87	68.31

ตารางผนวกที่ ก30 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) g/l				
		ก่อนการบำบัด	0.10	0.40	0.80	1.20	1.60
pH	-	12.21	3.04	2.67	2.24	2.28	2.20
Turbidity	NTU	177.0	6.17	3.85	1.23	3.13	3.78
Color	SU	175.10	20.97	36.17	87.10	111.40	157.50

ตารางผนวกที่ ก31 น้ำเสียชุดที่ 5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเฟนตัน

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
pH	-	12.21	1.95	2.26	2.39	2.51	2.68	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	5.64	4.03	1.73	4.61	1.38	96.81	97.72	99.02	97.40	99.22
Color	SU	175.10	89.43	158.40	133.80	129.70	47.34	48.93	9.54	23.59	25.93	72.96
COD	mg/l	2,099.24	1,248.48	1,028.16	881.28	1,175.04	807.84	40.53	51.02	58.02	44.03	61.52

ตารางผนวกที่ ก32 น้ำเสียชุดที่ 5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) g/l								
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)					
			3.30	4.40	5.50	3.30	4.40	5.50			
pH	-	12.21	2.58	2.46	2.35	-	-	-			
Turbidity	NTU	177.0	2.73	3.31	2.70	98.46	98.13	98.47			
Color	SU	175.10	163.80	155.60	145.50	6.45	11.14	16.90			
COD	mg/l	2,099.24	1,101.60	807.84	807.84	47.52	61.52	61.52			

ตารางผนวกที่ ก33 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO ₄) g/l					
			น้ำเสียหลังการบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			0.60	0.80	1.00	0.60	0.80	1.00
pH	-	12.21	3.15	3.02	2.87	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	3.28	3.10	3.45	98.15	98.25	98.05
Color	SU	12.21	3.15	3.02	2.87	74.20	75.27	76.49
COD	mg/l	177.0	3.28	3.10	3.45	98.15	98.25	98.05

ตารางผนวกที่ ก34 น้ำเสียชุดที่ 5 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ระยะเวลา (นาที)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			30	60	90	120	150	30	60	90	120	150
pH	-	12.21	3.10	3.07	3.07	2.99	2.69	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	2.86	2.45	3.06	2.36	2.21	98.38	98.62	98.27	98.67	98.75
Color	SU	175.10	108.50	98.42	106.80	80.85	98.23	38.04	43.79	39.01	53.83	43.90
COD	mg/l	2,099.24	734.40	660.96	587.52	514.08	514.08	65.02	68.51	72.01	75.51	75.51

ตารางผนวกที่ ก35 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 5 โดยเฟนตันที่ระยะเวลา 150 นาที (pH 4.00, H_2O_2 5.50 g/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.80 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.21	2.69	-
Turbidity	NTU	177.0	2.21	98.75
Color	SU	175.10	98.23	43.90
COD	mg/l	2,099.24	514.08	75.51

ตารางผนวกที่ ก36 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1-5 โดยเฟนตัน

ชุดข้อมูล	วันที่เก็บตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
		pH	Turbidity (NTU)	Color (SU)	COD (mg/l)
1	22/3/2552	-	97.84	87.99	89.15
2	26/4/2552	-	98.04	65.48	89.77
3	10/5/2552	-	98.21	50.99	67.22
4	26/7/2552	-	96.39	15.80	78.26
5	4/8/2552	-	98.75	43.90	75.51
ค่าเฉลี่ย			97.85	52.83	79.98

ตารางผนวกที่ ก37 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเหล็ก และ ซัลเฟตตกค้างหลังจากผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน

ชุดที่	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)	FeSO_4 (g/l)	H_2O_2 (g/l)	ปริมาณสารตกค้าง	
				Iron (mg/l)	Sulphate (mg/l)
2	300.00	1.00	5.50	139.30	2,635.00
	300.00	1.00	5.50	166.80	2,827.00
ค่าเฉลี่ย				153.05	2,731.00
5	300.00	0.80	5.50	55.00	4,449.52
	300.00	0.80	5.50	62.07	4,888.57
ค่าเฉลี่ย				58.53	4,669.05

อะลูมิเนียมซัลเฟต

ข้อมูลชุดที่ 1

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที และพีเอชเท่ากับ 7.50 โดยใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 5.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก38

การทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 5.00 g/l และพีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก39

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.00 และสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 4.60, 4.80, 5.00, 5.20 และ 5.40 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 5.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก40

ตารางผนวกที่ ก38 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย	ปริมาณ อะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)				
		ก่อนการบำบัด	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.76	5.34	4.80	4.70	4.62	4.59
Turbidity	NTU	134.0	24.9	21.9	19.9	19.2	17.6
Color	SU	141.30	27.33	34.96	24.91	21.68	21.85

ตารางผนวกที่ ก39 น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.76	4.32	4.61	4.65	4.82	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	17.5	17.8	19.4	18.7	86.94	86.72	85.52	86.04
Color	SU	141.30	21.96	20.83	25.62	23.48	84.46	85.26	81.87	83.38
COD	mg/l	3,277.12	2,038.40	2,077.60	2,156.00	2,116.80	37.80	36.60	34.21	35.41

ตารางผนวกที่ ก40 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			4.60	4.80	5.00	5.20	5.40	4.60	4.80	5.00	5.20	5.40
pH	-	12.76	4.69	4.65	4.58	4.45	3.92	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	18.4	17.6	17.5	19.6	22.4	86.27	86.87	86.94	85.37	83.28
Color	SU	141.30	22.45	21.79	21.75	23.81	25.69	84.11	84.58	84.61	83.15	81.82
COD	mg/l	3,277.12	2,156.00	2,077.60	1,999.20	2,156.00	2,234.40	34.21	36.60	39.00	34.21	31.82

ตารางผนวกที่ ก41 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 1 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.00, alum 5.00 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.76	4.58	-
Turbidity	NTU	134.0	17.5	86.94
Color	SU	141.30	21.75	84.61
COD	mg/l	3,277.12	1,999.20	39.00

ข้อมูลชุดที่ 2

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม
ซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 2.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก42

ทำการทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 2.00 g/l
และพีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 ผลการทดลองแสดงดัง
ตารางผนวกที่ ก43

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.00 และ
สารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.60, 1.80, 2.00, 2.20 และ 2.40 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต
ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.40 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก44

ตารางผนวกที่ ก42 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.21	4.83	4.19	3.98	3.84	3.81
Turbidity	NTU	197.0	19.8	12.30	12.80	15.60	18.10
Color	SU	190.5	95.62	89.20	90.87	91.28	92.23

ตารางผนวกที่ ก43 น้ำเสียชุดที่ 2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.21	3.99	4.08	4.12	4.15	-	-	-	-
Turbidity	NTU	197.0	11.2	12.4	16.4	18.2	94.31	93.71	91.68	90.76
Color	SU	190.5	88.10	89.74	91.75	92.41	53.75	52.89	51.84	51.49
COD	mg/l	2,987.60	1,792.56	1,846.88	1,955.52	2,064.16	40.00	38.18	34.55	30.91

ตารางผนวกที่ ก44 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40
pH	-	12.21	4.26	4.13	4.10	4.08	4.04	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	197.0	18.6	18.1	15.2	11.7	9.84	90.56	90.81	92.28	94.06	95.01
Color	SU	190.50	92.16	93.46	87.14	85.68	85.40	51.62	50.94	54.26	55.02	55.17
COD	mg/l	2,987.60	2,064.16	2,118.48	2,009.84	1,901.20	1,738.24	30.91	29.09	32.73	36.36	41.82

ตารางผนวกที่ ก45 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสี้ยวชุดที่ 2 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.00, alum 2.40 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.21	4.04	-
Turbidity	NTU	197.0	9.84	95.01
Color	SU	190.50	85.40	55.17
COD	mg/l	2,987.60	1,738.24	41.82

ข้อมูลชุดที่ 3

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม
ซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 1.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก46

การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00 g/l และพีเอช
ที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 ผลการทดลองแสดงดังตาราง
ผนวกที่ ก47

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.00 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 0.60, 0.80, 1.00, 1.20 และ 1.40 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม-
ซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 0.80 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก48

ตารางผนวกที่ ก46 น้ำเสี้ยวชุดที่ 3 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณ อะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.50	5.32	4.36	4.16	3.70	3.62
Turbidity	NTU	135.0	15.6	73.5	83.1	43.1	32.2
Color	SU	143.40	42.61	92.86	65.47	48.59	31.66

ตารางผนวกที่ ก47 น้ำเสียชุดที่ 3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.50	5.18	5.29	5.35	6.12	-	-	-	-
Turbidity	NTU	135.0	11.6	12.1	25.7	28.6	91.41	91.04	80.96	78.81
Color	SU	143.40	40.23	45.81	49.77	52.82	71.95	68.05	65.29	63.17
COD	mg/l	2,534.40	1,713.60	1,713.60	1,864.80	1,915.20	32.39	32.39	26.42	24.43

ตารางผนวกที่ ก48 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40
pH	-	12.50	5.23	5.32	4.98	4.92	4.81	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	135.0	62.5	9.72	10.4	38.7	35.8	53.70	92.80	92.30	71.33	73.48
Color	SU	143.40	86.42	38.73	42.10	58.62	59.81	39.74	72.99	70.64	59.12	58.29
COD	mg/l	2,534.40	2,066.40	1,663.20	1,713.60	1,764.00	1,764.00	18.47	34.38	32.39	30.40	30.40

ตารางผนวกที่ ก49 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 3 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.00, alum 0.80 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.50	5.32	-
Turbidity	NTU	135.0	9.72	92.80
Color	SU	143.40	38.73	72.99
COD	mg/l	2,534.40	1,663.20	34.38

ข้อมูลชุดที่ 4

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ พีเอชเท่ากับ 7.50 และปริมาณ
สารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต
ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก50

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 2.00 g/l และ
พีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.50 ผลการทดลองแสดงดังตาราง
ผนวกที่ ก51

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.60, 1.80, 2.00, 2.20 และ 2.40 g/l พบว่าปริมาณ
อะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 2.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก52

ตารางผนวกที่ ก50 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณ อะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.25	4.84	4.15	3.94	3.79	3.69
Turbidity	NTU	128.0	5.26	3.25	3.77	3.68	3.91
Color	SU	137.30	20.60	19.77	19.79	19.82	21.04

ตารางผนวกที่ ก51 น้ำเสียชุดที่ 4 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.25	3.95	3.99	4.12	4.09	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	3.72	3.03	3.69	3.20	97.09	97.63	97.12	97.50
Color	SU	137.30	18.45	18.13	18.98	18.09	86.56	86.80	86.18	86.82
COD	mg/l	2,667.81	1,361.89	1,175.33	1,268.61	1,361.89	48.95	55.94	52.45	48.95

ตารางผนวกที่ ก52 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40
pH	-	12.25	2.06	1.98	1.97	1.80	1.85	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	4.23	4.37	3.09	2.99	3.14	96.70	96.59	97.59	97.66	97.55
Color	SU	137.30	20.62	20.81	19.50	17.56	18.72	84.98	84.84	85.80	87.21	86.37
COD	mg/l	2,667.81	1,641.73	1,548.45	1,361.89	1,082.05	1,455.19	38.46	41.96	48.95	59.44	45.45

ตารางผนวกที่ ก53 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 4 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.50, alum 2.20 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.25	1.80	-
Turbidity	NTU	128.0	2.99	97.66
Color	SU	137.30	17.56	87.21
COD	mg/l	2,667.81	1,082.05	59.44

ข้อมูลชุดที่ 5

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม
ซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 2.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก54

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 2.00 g/l และ
พีเอช 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.50 ผลการทดลองแสดงดังตาราง
ผนวกที่ ก55

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.60, 1.80, 2.00, 2.20 และ 2.40 g/l พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม-
ซัลเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 2.40 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก56

ตารางผนวกที่ ก54 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณ อะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.21	4.10	3.83	3.67	3.57	3.53
Turbidity	NTU	177.0	1.78	1.59	1.63	1.62	1.83
Color	SU	175.10	33.82	35.88	34.98	35.32	35.85

ตารางผนวกที่ ก55 น้ำเสียชุดที่ 5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟต

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.21	4.05	4.12	4.10	4.08	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	2.59	1.81	3.10	2.01	98.54	98.98	98.25	98.86
Color	SU	175.10	39.64	62.47	40.65	34.41	77.36	64.32	76.78	80.35
COD	mg/l	2,099.24	1,436.16	1,256.64	1,256.64	1,256.64	31.59	40.14	40.14	40.14

ตารางผนวกที่ ก56 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟตที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณอะลูมิเนียมซัลเฟต (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40
pH	-	12.21	2.21	1.65	1.81	1.78	1.82	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	4.16	4.11	4.08	4.07	4.05	97.65	97.68	97.69	97.70	97.71
Color	SU	175.10	41.79	35.10	34.30	33.84	32.54	76.13	79.95	80.41	80.67	81.42
COD	mg/l	2,099.24	1,451.12	1,536.48	1,621.84	1,621.84	1,256.64	30.87	26.81	22.74	22.74	40.14

ตารางผนวกที่ ก57 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 5 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.50, alum 2.40 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.21	1.82	-
Turbidity	NTU	177.0	4.05	97.71
Color	SU	175.10	32.54	81.42
COD	mg/l	2,099.24	1,256.64	40.14

ตารางผนวกที่ ก58 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุดที่ 1 - 5 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้าง
ตะกอน

ชุดข้อมูล	วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
		pH	Turbidity	Color	COD
			(NTU)	(SU)	(mg/l)
1	7/3/2552	-	86.94	84.61	39.00
2	6/4/2552	-	95.01	55.17	41.82
3	9/5/2552	-	92.80	72.99	34.38
4	26/7/2552	-	97.66	87.21	59.44
5	4/8/2552	-	97.71	81.42	40.14
ค่าเฉลี่ย			94.02	76.28	94.02

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

ข้อมูลชุดที่ 1

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ สภาวะในการทดลอง กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที 10 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที 30 นาที ระยะเวลาในการตกตะกอน 30 นาที และพีเอชเท่ากับ 7.50 โดยใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.00 g/l ผลการทดลอง แสดงดังตารางผนวกที่ ก59

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 5.00 g/l และ พีเอช 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.50 ผลการทดลองแสดงดังตาราง ผนวกที่ ก60

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 4.60, 4.80, 5.00, 5.20 และ 5.40 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก61

ตารางผนวกที่ ก59 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.76	7.47	7.35	6.97	6.67	6.25
Turbidity	NTU	134.0	77.2	27.4	23.3	17.8	16.8
Color	SU	141.30	23.38	30.26	23.08	20.21	17.82

ตารางผนวกที่ ก60 น้ำเสียชุดที่ 1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.76	6.04	6.12	6.34	6.73	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	16.9	16.2	18.7	21.4	87.39	87.91	86.04	84.03
Color	SU	141.30	17.95	17.85	25.64	28.31	87.30	87.37	81.85	79.96
COD	mg/l	3,277.12	1,000.00	900.00	1,400.00	1,600.00	69.49	72.54	57.28	51.18

ตารางผนวกที่ ก61 น้ำเสียชุดที่ 1 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			4.60	4.80	5.00	5.20	5.40	4.60	4.80	5.00	5.20	5.40
pH	-	12.76	6.27	6.25	6.23	6.19	6.17	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	134.0	19.15	15.7	15.5	15.2	16.86	85.71	88.28	88.43	88.66	87.42
Color	SU	141.30	26.28	18.01	17.46	16.42	19.23	81.40	87.25	87.64	88.38	86.39
COD	mg/l	3,277.12	1,700.00	1,000.00	1,000.00	800.00	1,100.00	48.13	69.49	69.49	75.59	66.43

ตารางผนวกที่ ก62 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 1 ใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน (pH 7.50, alum 5.20 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.76	6.19	-
Turbidity	NTU	134.0	15.2	88.66
Color	SU	141.30	16.42	88.38
COD	mg/l	3,277.12	800.00	75.59

ข้อมูลชุดที่ 2

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่ pH เท่ากับ 7.50 และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก63

ทำการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสม ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 3.00 g/l และ pH ที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก64

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่ pH เท่ากับ 7.00 และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 2.60, 2.80, 3.00, 3.20 และ 3.40 g/l พบว่าปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก65

ตารางผนวกที่ ก63 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.15	-	-	7.45	7.28	7.08
Turbidity	NTU	115.0	-	-	2.06	2.56	3.09
Color	SU	102.50	-	-	3.99	4.16	5.57

หมายเหตุ - น้ำเสียมีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำดิบ

ตารางผนวกที่ ก64 น้ำเสียชุดที่ 2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.15	6.93	7.44	7.75	7.86	-	-	-	-
Turbidity	NTU	115.0	1.98	1.96	2.25	4.16	98.28	98.30	98.04	96.38
Color	SU	102.50	3.86	3.81	4.25	7.12	96.23	96.28	95.85	93.05
COD	mg/l	2,296.80	1,224.00	1,260.00	1,548.00	1,584.00	46.71	45.14	32.60	31.03

ตารางผนวกที่ ก65 น้ำเสียชุดที่ 2 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40
pH	-	12.15	6.48	6.46	6.42	6.39	6.28	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	115.0	4.52	3.18	1.85	1.86	1.85	96.07	97.23	98.39	98.38	98.39
Color	SU	102.50	8.43	6.15	3.98	3.96	4.18	91.78	94.00	96.12	96.14	95.92
COD	mg/l	2,296.80	1,512.00	1,440.00	1,188.00	1,296.00	1,296.00	34.17	37.30	48.28	43.57	43.57

ตารางผนวกที่ ก66 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 2 ใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน (pH 7.00, alum 3.00 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.15	6.42	-
Turbidity	NTU	115.0	1.85	98.39
Color	SU	102.50	3.98	96.12
COD	mg/l	2,296.80	1,188.00	48.28

ข้อมูลชุดที่ 3

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก67

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 4.00 g/l และพีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.50 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก68

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 3.60, 3.80, 4.00, 4.20 และ 4.40 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก69

ตารางผนวกที่ ก67 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.50	6.89	6.52	6.36	6.31	6.18
Turbidity	NTU	135.0	42.8	16.5	12.3	10.1	10.4
Color	SU	143.40	46.83	45.16	38.62	34.18	34.65

ตารางผนวกที่ ก68 น้ำเสียชุดที่ 3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.50	6.81	5.46	7.62	7.94	-	-	-	-
Turbidity	NTU	135.0	14.9	8.29	12.1	14.4	88.96	93.86	91.04	89.33
Color	SU	143.40	35.83	31.46	32.74	34.82	75.01	78.06	77.17	75.72
COD	mg/l	2,534.40	1,788.48	1,684.80	1,749.60	1,788.48	29.43	33.52	30.97	29.43

ตารางผนวกที่ ก69 น้ำเสียชุดที่ 3 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			3.60	3.80	4.00	4.20	4.40	3.60	3.80	4.00	4.20	4.40
pH	-	12.50	6.35	6.37	6.28	6.27	6.25	-	-	-	-	-
Turbidity (NTU)	NTU	135.0	12.7	12.6	8.65	5.68	7.49	90.59	90.67	93.59	95.79	94.45
Color (SU)	SU	143.40	42.37	32.49	30.62	28.12	29.47	70.45	77.34	78.65	80.39	79.45
COD (mg/l)	mg/l	2,534.40	1,749.60	1,684.80	1,620.00	1,490.40	1,555.20	30.97	33.52	36.08	41.19	38.64

ตารางผนวกที่ ก70 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 3 ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาร
สร้างตะกอน (pH 7.50, alum 4.20 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.50	6.27	-
Turbidity	NTU	135.0	5.68	95.79
Color	SU	143.40	28.12	80.39
COD	mg/l	2,534.40	1,490.40	41.19

ข้อมูลชุดที่ 4

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ
ใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณโพลี-
อะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก71

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 4.00 g/l
และค่าพีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 8.00 ผลการทดลอง
แสดงดังตารางผนวกที่ ก72

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 8.00 และ
ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 3.60, 3.80, 4.00, 4.20 และ 4.40 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียม-
คลอไรด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 4.20 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก73

ตารางผนวกที่ ก71 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.25	7.05	6.47	6.07	5.52	5.46
Turbidity	NTU	128.0	44.4	2.09	1.76	1.66	4.98
Color	SU	137.30	51.62	14.96	13.51	12.91	16.65

ตารางผนวกที่ ก72 น้ำเสียชุดที่ 4 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.25	6.05	6.12	6.26	6.44	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	1.36	1.18	1.17	1.26	98.94	99.08	99.09	99.02
Color	SU	137.30	17.15	17.03	17.18	17.68	87.51	87.60	87.49	87.12
COD	mg/l	2,667.81	1,735.01	1,548.45	1,361.89	1,455.17	34.97	41.96	48.95	45.45

ตารางผนวกที่ ก73 น้ำเสียชุดที่ 4 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			3.60	3.80	4.00	4.20	4.40	3.60	3.80	4.00	4.20	4.40
pH	-	12.25	6.08	6.14	6.28	6.24	6.14	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	128.0	1.82	1.76	1.74	1.15	1.17	98.58	98.63	98.64	99.10	99.09
Color	SU	137.30	19.96	19.14	19.16	15.20	18.40	85.46	86.06	86.05	88.93	86.60
COD	mg/l	2,667.81	1,641.73	1,585.76	1,548.45	1,026.08	1,082.05	38.46	40.56	41.96	61.54	59.44

ตารางผนวกที่ ก74 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียชุดที่ 4 ใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน (pH 8.00, alum 4.20 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียก่อนบำบัด	น้ำเสียหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.25	6.24	-
Turbidity	NTU	128.0	1.15	99.10
Color	SU	137.30	15.20	88.93
COD	mg/l	2,667.81	1,026.08	61.54

ข้อมูลชุดที่ 5

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ ที่พีเอชเท่ากับ 7.50 และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.00 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก75

ทำการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 3.00 g/l และ พีเอชที่ 7.00, 7.50, 8.00 และ 8.50 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก76

ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียด ที่พีเอชเท่ากับ 7.00 และ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 2.60, 2.80, 3.00, 3.20 และ 3.40 g/l พบว่าปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.40 g/l ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก77

ตารางผนวกที่ ก75 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบหยาบ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)				
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
pH	-	12.21	7.02	5.86	5.15	4.77	4.55
Turbidity	NTU	177.0	2.73	2.22	2.01	2.68	2.74
Color	SU	175.10	39.90	34.90	33.08	33.41	33.60

ตารางผนวกที่ ก76 น้ำเสียชุดที่ 5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ค่าพีเอช							
			น้ำเสียหลังการบำบัด				ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
			7.00	7.50	8.00	8.50	7.00	7.50	8.00	8.50
pH	-	12.21	5.65	5.81	5.90	6.12	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	2.98	3.12	4.00	4.48	98.32	98.24	97.74	97.47
Color	SU	175.10	35.54	35.95	36.48	38.59	79.70	79.47	79.17	77.96
COD	mg/l	2,099.24	1,280.40	1,346.40	1,346.46	1,666.88	39.01	35.86	35.86	20.60

ตารางผนวกที่ ก77 น้ำเสียชุดที่ 5 ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมแบบละเอียด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย ก่อนการบำบัด	ปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (g/l)									
			น้ำเสียหลังการบำบัด					ประสิทธิภาพการบำบัด (%)				
			2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40
pH	-	12.21	2.40	2.33	3.48	3.82	3.13	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	177.0	5.95	6.03	6.45	4.50	2.35	96.64	96.59	96.36	97.46	98.67
Color	SU	175.10	42.38	39.81	36.08	36.45	35.15	75.80	77.26	79.39	79.18	79.93
COD	mg/l	2,099.24	1,451.12	1,536.48	1,621.84	1,451.12	1,168.88	30.87	26.81	22.74	30.87	44.32

ตารางผนวกที่ ก78 สรุปประสิทธิภาพที่เหมาะสมของน้ำเสียดิบที่ 5 ใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน (pH 7.00, alum 3.40 g/l)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียดิบก่อนบำบัด	น้ำเสียดิบหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
pH	-	12.21	3.13	-
Turbidity	NTU	177.0	2.35	98.67
Color	SU	175.10	35.15	79.93
COD	mg/l	2,099.24	1,168.88	44.32

ตารางผนวกที่ ก79 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดิบที่ 1-5 โดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็น สารสร้างตะกอน

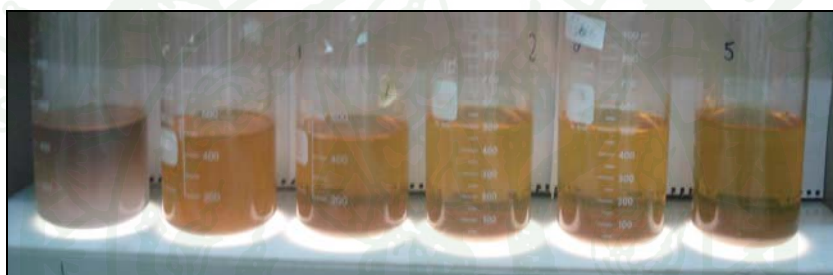
ชุดข้อมูล	วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
		pH	Turbidity	Color	COD
			(NTU)	(SU)	(mg/l)
1	7/3/2552	-	88.66	88.38	75.59
2	18/4/2552	-	98.39	96.12	48.28
3	9/5/2552	-	95.79	80.39	41.19
4	26/7/2552	-	99.10	88.93	61.54
5	4/8/2552	-	98.67	79.93	44.32
ค่าเฉลี่ย			96.12	86.75	54.18



ภาพแสดงผลการทดลอง



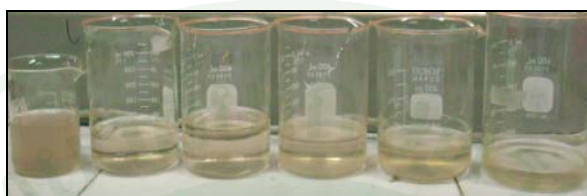
ภาพผนวกที่ ข1 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตันที่ pH น้ำดิบ



ภาพผนวกที่ ข2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน



ภาพผนวกที่ ข3 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต



ภาพผนวกที่ ข4 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์



Blank

Alum

PAC

Fenton

ภาพผนวกที่ ข5 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเฟนตัน อะลูมิเนียมซัลเฟต และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์



ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายเฟนตัน

1. การคำนวณกรด (H_2SO_4) และด่าง (NaOH) ที่ใช้ในการปรับ pH ก่อน และหลังบำบัดน้ำเสีย

(MW of H_2SO_4 = 98, NaOH = 40, H_2O_2 = 34, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ = 278)

ปรับ pH 12.30 เป็น 3.40 ใช้กรด H_2SO_4 98% 1 N ปริมาตร 8.10 ml ต่อน้ำเสีย 500 ml

$$\text{ราคา } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 98\% 4.16 บาท/กก. ราคาต่อกรัม} = \frac{1.00 \text{ g} \times 4.16 \text{ บาท}}{1,000 \text{ g}} = 0.00416 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 1N} &= \text{สารละลาย 1L มีเนื้อสารอยู่ 1 กรัม/กรัมสมมูลย์ คิดเป็นเนื้อกรดเท่ากับ 49.00 g} \\ \text{ดังนั้น } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 8.10 ml} &\text{ คิดเป็นน้ำหนัก} = \frac{8.10 \text{ ml} \times 49.00 \text{ g}}{1,000 \text{ ml}} = 0.397 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมราคา } \text{H}_2\text{SO}_4 &= 0.397 \text{ g} \times 0.00416 \text{ บาท} = 0.00165 \text{ บาท/น้ำเสีย 500 ml} \\ \text{ถ้าคิดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.} &= \frac{0.00165 \text{ บาท} \times 10^6 \text{ ml}}{500 \text{ ml}} = 3.30 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ปรับ pH 2.30 เป็น 7.00 ใช้ด่าง NaOH 1 N ปริมาตร 1.32 ml ต่อน้ำเสีย 100 ml

$$\text{ราคา } \text{NaOH} \text{ 10.00 บาท/กก. ราคาต่อกรัม} = \frac{1.00 \text{ g} \times 10.00 \text{ บาท}}{1,000 \text{ g}} = 0.01 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{NaOH 1N} &= \text{สารละลาย 1L มีเนื้อสารอยู่ 1 กรัม/กรัมสมมูลย์ คิดเป็นเนื้อด่างเท่ากับ 40.00 g} \\ \text{ดังนั้น } \text{NaOH} \text{ 1.32} &\text{ คิดเป็นน้ำหนัก} = \frac{1.32 \text{ ml} \times 40.00 \text{ g}}{1,000 \text{ ml}} = 0.0528 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมราคา } \text{NaOH} &= 0.0528 \text{ g} \times 0.01 \text{ บาท} = 0.000528 \text{ บาท/น้ำเสีย 100 ml} \\ \text{ถ้าคิดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.} &= \frac{0.000528 \text{ บาท} \times 10^6 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} = 5.28 \text{ บาท} \end{aligned}$$

2. การคำนวณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

(FeSO₄·7H₂O ใช้ 0.92 g/l, ราคา 9.00 บ./kg., H₂O₂ ใช้ 6.38 g/l, ราคา 17.00 บ./kg.)

$$\text{ราคา FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \frac{0.92 \text{ g} \times 10^3 \text{ L} \times 9 \text{ บาท} \times 1 \text{ kg}}{\text{L} \quad \text{m}^3 \quad \text{kg} \quad 10^3 \text{ g}} = 8.28 \text{ บาท/ m}^3$$

$$\text{ราคา H}_2\text{O}_2 = \frac{6.38 \text{ g} \times 10^3 \text{ L} \times 17 \text{ บาท} \times 1 \text{ kg}}{\text{L} \quad \text{m}^3 \quad \text{kg} \quad 10^3 \text{ g}} = 108.46 \text{ บาท/ m}^3$$

$$\text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวม} = 3.30 + 5.28 + 8.28 + 108.46 = 125.32 \text{ บาท/ m}^3$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายอะลูมิเนียมซัลเฟต

1. การคำนวณกรด (H₂SO₄) และด่าง (NaOH) ที่ใช้ในการปรับ pH ก่อน และหลังบำบัดน้ำเสีย
ปรับ pH 12.30 เป็น 7.20 ใช้กรด H₂SO₄ 98% 1 N ปริมาตร 4.64 ml ต่อน้ำเสีย 500 ml

$$\text{ดังนั้น H}_2\text{SO}_4 \text{ 4.64 ml คิดเป็นน้ำหนัก} = \frac{4.64 \text{ ml} \times 49.00 \text{ g}}{1,000 \text{ ml}} = 0.23 \text{ g}$$

$$\text{รวมราคา H}_2\text{SO}_4 = 0.23 \text{ g} \times 0.00416 \text{ บาท} = 0.000957 \text{ บาท/น้ำเสีย 500 ml}$$

$$\text{ถ้าคิดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.} = \frac{0.000957 \text{ บาท} \times 10^6 \text{ ml}}{500 \text{ ml}} = 1.91 \text{ บาท}$$

ปรับ pH 2.30 เป็น 7.00 ใช้ด่าง NaOH 1 N ปริมาตร 0.85 ml ต่อน้ำเสีย 100 ml

$$\text{ดังนั้น NaOH 0.85 คิดเป็นน้ำหนัก} = \frac{0.85 \text{ ml} \times 40.00 \text{ g}}{1,000 \text{ ml}} = 0.034 \text{ g}$$

$$\text{รวมราคา NaOH} = 0.034 \text{ g} \times 0.01 \text{ บาท} = 0.00034 \text{ บาท/น้ำเสีย 100 ml}$$

$$\text{ถ้าคิดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.} = \frac{0.00034 \text{ บาท} \times 10^6 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} = 3.40 \text{ บาท}$$

2. การคำนวณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

(Alum ใช้ 2.56 g/l, ราคา 8.00 บ./kg.)

$$\text{ราคา Alum} = \frac{2.56 \text{ g} \times 10^3 \text{ L} \times 8.00 \text{ บาท} \times 1 \text{ kg}}{\text{L} \quad \text{m}^3 \quad \text{kg} \quad 10^3 \text{ g}} = 20.48 \text{ บาท/m}^3$$

$$\text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวม} = 1.91 + 3.40 + 20.48 = 25.79 \text{ บาท/m}^3$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

1. การคำนวณกรด (H_2SO_4) และด่าง (NaOH) ที่ใช้ในการปรับ pH ก่อน และหลังบำบัดน้ำเสีย
ปรับ pH 12.30 เป็น 7.40 ใช้กรด H_2SO_4 98% 1 N ปริมาตร 4.46 ml ต่อน้ำเสีย 500 ml

$$\text{ดังนั้น } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 4.46 ml คิดเป็นน้ำหนัก} = \frac{4.46 \text{ ml} \times 49.00 \text{ g}}{1,000 \text{ ml}} = 0.22 \text{ g}$$

$$\text{รวมราคา } \text{H}_2\text{SO}_4 = 0.22 \text{ g} \times 0.00416 \text{ บาท} = 0.000915 \text{ บาท/น้ำเสีย 500 ml}$$

$$\text{ถ้าคิดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.} = \frac{0.000915 \text{ บาท} \times 10^6 \text{ ml}}{500 \text{ ml}} = 1.83 \text{ บาท}$$

2. การคำนวณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

(PAC ใช้ 4.00 g/l, ราคา 20.33 บ./kg.)

$$\text{ราคา Alum} = \frac{4.00 \text{ g} \times 10^3 \text{ L} \times 20.33 \text{ บาท} \times 1 \text{ kg}}{\text{L} \quad \text{m}^3 \quad \text{kg} \quad 10^3 \text{ g}} = 81.32 \text{ บาท/m}^3$$

$$\text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวม} = 1.83 + 81.32 = 83.15 \text{ บาท/m}^3$$



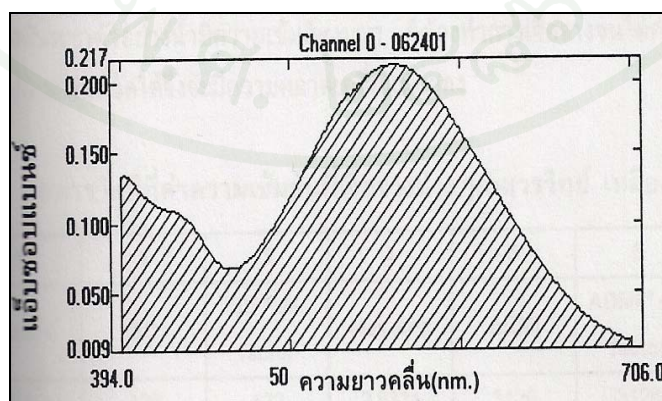
วิธีการตรวจวัดสีหน่วยสีเอสยู (SU unit)

สมัยก่อนเรามักจะทำการวัดค่าเอ็บซอร์เบ้นซ์ที่ความยาวคลื่นเด่นเพียงค่าเดียว แต่ความเป็นจริงแล้วสีที่ตาคนเรามองเห็นอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 nm ดังนั้นการวัดสีหรือการวัดประสิทธิภาพในการลดสีของระบบบำบัด จึงควรทำการวัดทั้งช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 nm จึงจะให้ผลที่ถูกต้องตามความเป็นจริงมากกว่า โดยมีวิธีการดังนี้

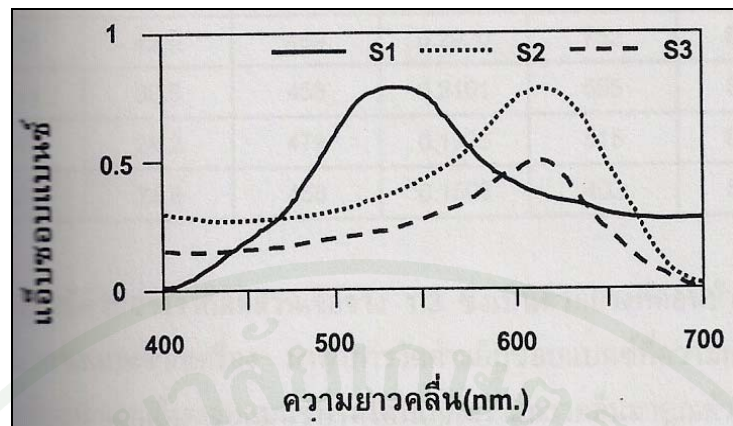
1. นำตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านเยื่อกรอง 0.45 ไมครอน แล้วไปเข้าเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดค่าเอ็บซอร์เบ้นซ์ที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 700 nm
2. แล้วนำมาแสดงเป็นรูปกราฟระหว่างค่าเอ็บซอร์เบ้นซ์กับความยาวคลื่น พื้นที่ใต้กราฟคือค่าสีในหน่วยเอสยู ดังตัวอย่างในภาพผนวกที่ ง1

ผู้จัดทำนายเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะมีซอฟต์แวร์ที่สามารถจัดเก็บข้อมูลที่ออกจากเครื่องส่งตรงเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ และตัวโปรแกรมยังสามารถคำนวณพื้นที่ใต้กราฟให้เราได้โดยอัตโนมัติ

จากภาพผนวกที่ ง2 พบว่าสี S1 และ S2 มีค่าสีเอสยูเท่ากันเนื่องจากมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน แต่เป็นคนละโทนสีโดยดูได้จากความยาวคลื่นเด่นของ S1 อยู่ที่ประมาณ 540 nm ส่วนความยาวคลื่นเด่นของ S2 อยู่ที่ประมาณ 620 nm อนึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสี S2 และ S3 สรุปได้ว่าสีสองชนิดนี้มีโทนสีเดียวกันเนื่องจากความยาวคลื่นเด่นอยู่ที่จุดเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ความเข้มของสี S3 ต่ำกว่าความเข้มของสี S2 เนื่องจากพื้นที่ใต้กราฟของสี S3 มีค่าต่ำกว่าของสี S2



ภาพผนวกที่ ง1 กราฟตัวอย่างการคำนวณเรื่องเอสยู



ภาพผนวกที่ ง2 กราฟเปรียบเทียบค่าเอสยูและความเข้มของสี

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาววีระนุช บุญรุ่ง

เกิดวันที่ 20 กันยายน 2527

สถานที่เกิด อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี

ประวัติการศึกษา วท.บ. (อนามัยสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ตำแหน่งปัจจุบัน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน -

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ งานวิจัยเรื่องการลดปริมาณสารสร้างตะกอน (Coagulant) โดยการนำตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของนิคมอุตสาหกรรมบ้านหว้า (ไฮเทค) กลับมาใช้เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid) ร่วมกับ Poly Aluminium Chloride

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2551 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์