

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารที่ก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสีย
จากโรงงานอุตสาหกรรม

ANALYSIS OF THE AMOUNT OF SCALE FORMATION
IN THE INDUSTRIAL WASTE PIPES

นางสาวกตัญญูตา
นางสาวจันทร์จุฑา
นางสาวนิลาวัลย์
นายพิสิฐ

จันทร์เทพ
วงศ์เจตจันทร์
สามพันธ์
วีระพันธ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารที่ก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสีย
จากโรงงานอุตสาหกรรม

ANALYSIS OF THE AMOUNT OF SCALE FORMATION
IN THE INDUSTRIAL WASTE PIPES

นางสาวกตัญญูตา

จันทร์เทพ

นางสาวจันทร์จุฑา

วงศ์เจตจันทร์

นางสาวนิลาวัลย์

สามพันธ์

นายพิสิฐ

วีระพันธ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

ANALYSIS OF THE AMOUNT OF SCALE FORMATION
IN THE INDUSTRIAL WASTE PIPES

Miss Katanyuta	Janthep
Miss Janjutar	Wongjetjan
Miss Nilawan	Sampan
Mr. Phisit	Werapan




A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารที่ก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรม

ชื่อนักศึกษา นางสาวกตัญญูดา จันท์เทพ 55050881
นางสาวจันทร์จุฑา วงศ์เจตจันทร์ 55050891
นางสาวนิลาวัลย์ สามพันธ์ 55050942
นายพิสิฐ วีระพันธ์ 55050967

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้รับ
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ กรรมการ	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารที่ก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรม		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกตัญญูดา	จันทร์เทพ	55050881
	นางสาวจันทร์จุฑา	วงศ์เจตจันทร์	55050891
	นางสาวนิลาวัลย์	สามพันธ์	55050942
	นายพิสิฐ	วีระพันธ์	55050967
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ก่อให้เกิดตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงภายใต้การใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรม 3 กลุ่ม คือ อุตสาหกรรมฟอกย้อม แปรรูปอาหารและอิเล็กทรอนิกส์ วิเคราะห์พารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องกับตะกรันในเส้นท่อน้ำเสีย คือ ฟอสเฟต ซัลเฟต แคลเซียม เหล็ก สังกะสี สภาพต่างและความกระด้าง ทำนายแนวโน้มการเกิดตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียโดยใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ ทำนายแนวโน้มในการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และกราฟเบย์ลิส จากการศึกษาพบว่า คาร์บอเนตและซัลเฟต คือ ปริมาณไอออนลบที่พบมากที่สุดและแคลเซียมคือปริมาณไอออนบวกที่พบมากที่สุด ดังนั้น แนวโน้มการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตจะพบในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ขณะที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะมีแนวโน้มการเกิดตะกรันแคลเซียมซัลเฟต อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารจะพบตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมซัลเฟตน้อยที่สุด

คำสำคัญ : แคลเซียมคาร์บอเนต ตะกรัน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม เส้นท่อน้ำเสีย

Title	Analysis of the amount of scale formation in the industrial waste pipes.		
Students	Miss Katanyuta	Janthep	55050881
	Miss Janjutar	Wongjetjan	55050891
	Miss Nilawan	Sampan	55050942
	Mr. Phisit	Werapan	55050967
Degree	Bachelor of Science (B.Sc Environmental Resource Chemistry)		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst. Prof. Pitsamai Chairat-utai		

ABSTARCT

This special project was analyzed the amount of scale formation in the industrial waste pipe by grab sampling under the three types of industrial that is dye industry, food processing and electronics. The parameter which relative to scale in pipe are phosphate, sulphate, calcium, iron, zinc, alkalinity and hardness. The forcast precipitate trend in waste pipe was calculated by Langelier saturation index and Ryznar stability index. The scale of calcium carbonate was calculated by correlation coefficient and Baylist curve. The experimental results found that carbonate and sulphate are the highest of anion and calcium is the highest of cation. Therefore, the precipitate of calcium carbonate will be find in dye industry, while calcium sulphate will be find in electronics industry. The scale of calcium carbonate and calcium sulphate are the lowest in food processing industry.

Keywords : calcium carbonate, scale, industrial wastewater, waste pipes

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษทางวิทยาศาสตร์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ซึ่งเป็นผู้ดูแลตลอดทั้งโครงการ ให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนเสนอแนวความคิดอันเป็นประโยชน์ต่อการทำการศึกษาโครงการพิเศษ รวมทั้งได้กรุณา เสียสละเวลาตรวจโครงการพิเศษ และแก้ไขมาตั้งแต่ต้นจนแล้วเสร็จ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และรศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่ง กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ และให้คำปรึกษาแนะนำรวมทั้งคณาจารย์ทุกๆ ท่านที่ให้ คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณศิริพรรณ อารังคุณากร เจ้าหน้าที่โรงงานบำบัดน้ำเสีย ที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ในการเก็บตัวอย่างน้ำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ หน่วยงานสนับสนุนโครงการ พิเศษในครั้งนี้ ประกอบด้วย งานพัสดุ งานการเงิน สังกัดฝ่ายบริหารและวางแผน คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนด้านการจัดซื้อวัสดุและเบิกจ่ายเงินให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกใน ทุกๆ ด้านอย่างเต็มที่ และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะ- วิทยาศาสตร์ ทุกคนที่มีส่วนร่วมในการให้ความรู้และให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คำจำกัดความหรือนิยามศัพท์ที่ควรทราบ	3
2.2 กลุ่มโรงงานภายในนิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร	3
2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต	4
2.4 ลักษณะน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรม	7
2.5 สมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นต่างและความกระด้าง	18
2.7 การเกิดตะกอน	19
2.8 ประเภทของตะกอนชนิดต่างๆ	20
2.9 ตะกอนและดัชนีทำนายการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต	22
2.10 การป้องกันตะกอนเกิดจากสารแขวนลอย	26
2.11 การป้องกันตะกอนเกิดจากจุลินทรีย์	26
2.12 หลักการป้องกันและควบคุมการเกิดตะกอน	27
2.13 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน	30
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	34
3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำตัวอย่าง	35
3.3 การสร้างตะกอนจำลองบนท่อเหล็กเพื่อศึกษาการชะล้างตะกอน	37
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรม	39
4.2 แนวโน้มของตะกอนในเส้นท่ออยู่ในรูปตะกอน CaCO_3	41
4.3 แนวโน้มของตะกอนในรูปตกตะกอนร่วมชนิดอื่นๆ	44
4.4 การละลายตะกอนหรือตะกอน CaCO_3 ออกจากท่อเหล็ก	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	58
ภาคผนวก ค	77
ภาคผนวก ง	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ลักษณะของน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อม	8
2.2	ลักษณะของน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	13
2.3	ไอออนประจุบวกไอออนประจุลบที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ	17
2.4	ลำดับความกระด้างหน่วยพีพีเอ็มในรูป CaCO_3	17
2.5	การทำนายการเกิดตะกอน/การกัดกร่อน ด้วยค่า Langelier Saturation Index	24
2.6	การทำนายการเกิดตะกอน/การกัดกร่อน ด้วยค่า Ryznar Stability Index	25
2.7	Summary of chemical and non-chemical treatment options	28
2.8	ตารางแสดงปฏิกิริยาการเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำ	30
3.1	วิธีวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย	37
4.1	ผลการทำนายแนวโน้มการก่อตะกอนโดยใช้ดัชนีแลงเกียร์และดัชนีไรนาร์	41
4.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ก่อตะกอนในเส้นท่อน้ำเสีย โดยคิดจากน้ำหนักสมมูล	45
ข-1	ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานฟอสเฟต	58
ข-2	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง	59
ข-3	ค่าความขุ่นของสารมาตรฐานซิลเฟต	60
ข-4	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง	61
ข-5	ค่าความเข้มข้นซิลเฟตของน้ำเสีย	63
ข-6	คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.02 N	63
ข-7	สภาพต่างของน้ำตัวอย่าง	64
ข-8	สภาพต่างของน้ำตัวอย่างจากการคำนวณ	65
ข-9	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างในน้ำเสีย	66
ข-10	คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของอีดีทีเอ 0.01 M	67
ข-11	ความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย	67
ข-12	คำนวณหาความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่าง	68
ข-13	ค่าการดูดกลืนแสงสารละลายมาตรฐานแคลเซียม	68
ข-14	ค่าการดูดกลืนแสงสารละลายมาตรฐานเหล็ก	69
ข-15	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสังกะสี	69
ข-16	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย	70
ข-17	ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย	73
ข-18	ผลการวิเคราะห์ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l)	74
ข-19	ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชของน้ำเสีย	74
ข-20	ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของน้ำเสีย	75
ข-21	ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (ms/cm) ของน้ำเสีย	75
ข-22	วิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ดัชนีแลงเกียร์และดัชนีไรนาร์	76
ค-1	ความสัมพันธ์ของสภาพต่าง	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟเบย์ลิส	26
3.1 แผนผังเส้นท่อน้ำเสียของการนิคมอุตสาหกรรม	36
3.2 การเตรียมท่อเหล็ก	38
4.1 ค่าพีเอชในน้ำเสีย	40
4.2 ค่าอุณหภูมิในน้ำเสีย	40
4.3 ค่าความกระด้างทั้งหมดในน้ำเสีย	40
4.4 ค่าสภาพต่างทั้งหมดในน้ำเสีย	40
4.5 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในน้ำเสีย	40
4.6 ค่าฟอสเฟตในน้ำเสีย	40
4.7 ค่าซิลเฟตในน้ำเสีย	41
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพต่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม	42
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพต่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร	42
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพต่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	43
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและสภาพต่างของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีผลต่อการเกิดตะกอนและการกัดกร่อนเส้นท่อ โดยพิจารณาจากกราฟเบย์ลิส	44
4.12 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็กที่ไม่แช่น้ำเสีย	46
4.13 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียเป็นเวลา 7 วัน	46
4.14 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็กหลังจากฉีดล้างด้วยน้ำธรรมดา	47
4.15 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียเป็นเวลา 7 วันฉีดล้างด้วยน้ำธรรมดา	47
4.16 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียเป็นเวลา 7 วันฉีดล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์	47
ข-1 กราฟมาตรฐานของออร์โธฟอสเฟต	58
ข-2 กราฟมาตรฐานค่าความขุ่นของสารละลายมาตรฐานซิลเฟต	60
ข-3 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแคลเซียม	68
ข-4 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานเหล็ก	69
ข-5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานเหล็ก	70

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
a	ตัวอย่างกลุ่ม a ซึ่งปราศจากตัวอย่างกลุ่มอื่นๆ ซึ่งอาจแตกต่างกันหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
b	ตัวอย่างกลุ่ม b ซึ่งปราศจากตัวอย่างกลุ่มอื่นๆ ซึ่งอาจแตกต่างกันหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
BOD	Biochemical Oxygen Demand ปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์
COD	Chemical Oxygen Demand ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์
M	โมลาริตี หรือ โมลาร์ เป็นหน่วยความเข้มข้นในจำนวนโมลต่อปริมาตรตัวทำละลาย 1 ลิตร
meq/L	ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ จำนวนกรัมสมมูลของสารละลาย 1 ลิตร คิดเป็นหน่วย มิลลิอิกวาเลนต์ต่อลิตร
mg/L	จำนวนตัวถูกละลายปริมาณมิลลิกรัมต่อสารละลายปริมาตร 1 ลิตร
mg/L as CaCO ₃	มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต
mN	จำนวนตัวถูกละลายในน้ำหนักมิลลิสมมูลต่อตัวทำละลายปริมาตร 1 ลิตร
LSI	Langelier Saturation Index (ดัชนีแลงเกีเยอร์)
ppm	หน่วยความเข้มข้นส่วนในล้านส่วน
R-Squared : R ²	ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมด
RSI	Ryznar Stability Index (ดัชนีไรนาร์)
St.Dev	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันศักยภาพการใช้พื้นที่ภายในนิคมอุตสาหกรรม จังหวัดสมุทรสาครเต็มทุกพื้นที่โดยมีกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมหลักๆ ได้แก่ โรงงานฟอกย้อม โรงงานแปรรูปอาหาร โรงงานพิมพ์ผ้า โรงงานผลิตพลาสติก โรงงานผลิตหมึก ฯลฯ ซึ่งโรงงานเหล่านี้มีการใช้สารเคมีในการผลิตที่แตกต่างกันออกไปและบางโรงงานมีการใช้หม้อไอน้ำในการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ จึงเป็นเหตุทำให้เกิดปัญหาการเกิดตะกอนในเส้นท่อน้ำต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่ตะกอนที่พบเป็นตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ซึ่งแคลเซียมอาจจะมาจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรือในหม้อไอน้ำ จึงอาจจะมีการเติมสารที่เรียกว่า โพรเทคทีฟ (protective) เช่น สารประกอบจำพวกฟอสเฟตลงในหม้อไอน้ำ ซึ่งสารนี้มีความสามารถในการแย่งทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะอย่างแคลเซียม ทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ ปริมาณการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงลดลง (มันสิน, 2545) เมื่อทางอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียลงในท่อน้ำเสียของการนิคมอุตสาหกรรม ทำให้สารป้องกันการเกิดตะกอนไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะชนิดอื่นในน้ำ เมื่อฟอสเฟตไปจับกับไอออนโลหะตัวอื่น แคลเซียมที่เป็นอิสระจึงจับกับคาร์บอเนตทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะตามผนังท่อ เมื่อตะกอนมีความหนาขึ้นทำให้อัตราการไหลของน้ำช้าลง เป็นอุปสรรคต่อการส่งน้ำเสียไปบำบัด ทางนิคมได้มีการแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนท่อตรงจุดที่เกิดตะกอนซึ่งจะทำในช่วงเทศกาลวันหยุดยาว เช่น ปีใหม่ สงกรานต์ เพราะการเปลี่ยนท่อจะต้องหยุดการส่งน้ำเสียไประบบบำบัดรวม

พัชรินทร์ ศศิธรและสกุลรัตน์ (2557) ได้นำตะกอนจากเส้นท่อน้ำเสียรวมมาศึกษาชนิดและองค์ประกอบหลัก พบว่า ในตะกอนมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก งานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจจะศึกษาที่มาของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและสารตะกอนรูปอื่นๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และหาวิธีในการล้างตะกอนออกจากเส้นท่อน้ำเสียได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ก่อให้เกิดตะกอนที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกลุ่มต่างๆ
- 2) เพื่อทำนายแนวโน้มการก่อตะกอนในเส้นท่อน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และกราฟเบย์ลิสทำนายแนวโน้มการก่อตะกอน-แคลเซียมคาร์บอเนต
- 3) เพื่อศึกษาการละลายตะกอนเคมีโดยใช้กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นต่ำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ตัวอย่างน้ำเสียจากนิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร โดยใช้วิธีการเก็บแบบจ้วงแบ่งออกเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร อิเล็กทรอนิกส์และฟอกย้อม
- 2) พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ฟอสเฟต ซัลเฟต ความกระด้าง สภาพต่าง แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียตามกลุ่มของอุตสาหกรรม
- 3) จำลองการเกิดตะกอน CaCO_3 โดยใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ผ่าซีกความยาว 12 นิ้ว แช่ในน้ำเสียเป็นเวลา 7 วัน
- 4) ใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายที่ใช้ล้างตะกอน CaCO_3 ที่เกิดจากการจำลองตะกอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงปริมาณสารก่อตะกอนที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย
- 2) สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมตามกลุ่มของอุตสาหกรรมก่อนส่งไปยังระบบบำบัดรวมของการนิคมอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดตะกรันในเส้นท่อน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างและเกิดการอุดตันภายในเส้นท่อ ทำให้ประสิทธิภาพในการไหลของน้ำเสียผ่านเส้นท่อลดลง การเกิดตะกรันในเส้นท่อน้ำทิ้งเกิดมาจากการรองรับน้ำเสียของหลายกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมภายในนิคม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันของสารปนเปื้อนและถูกสะสมอยู่ภายในเส้นท่อเป็นเวลานาน สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงสาเหตุและวิธีการป้องกันการเกิดตะกรัน เพื่อให้เส้นท่อน้ำทิ้งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และยืดอายุการใช้งานให้เพิ่มขึ้น

2.1 คำจำกัดความหรือนิยามศัพท์ที่ควรทราบ

ตะกรัน (scale) หมายถึง ธาตุที่มารวมตัวกันเป็นก้อนแข็งยึดเกาะตามผิวของอุปกรณ์ซึ่งมีความร้อนโดยปกติธาตุเหล่านี้จะละลายอยู่ในน้ำ เมื่อผ่านผิวของอุปกรณ์ที่มีความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะก่อตัวยึดกันแน่นตามผิวของอุปกรณ์เกิดเป็นตะกรันแข็งขึ้นมา (ณัฐ คุ้มภู, 2553)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (industrial wastewater) หมายถึง น้ำสกปรกที่เกิดจากขบวนการผลิตซึ่งอาจจะระบายและกำจัดแยกต่างหาก หรืออาจรวมเข้ากับท่อเดียวกันกับน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือน้ำเสียรวมก็ได้ (วรรณศรี บุญยรัตพันธุ์, 2536)

หม้อไอน้ำ (Boiler) หมายถึง ภาชนะปิดที่ใช้ผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศโดยใช้ความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิงหรือจากไฟฟ้าหรือพลังงานนิวเคลียร์ (สภาวิศวกร, ม.ป.ป)

2.2 กลุ่มโรงงานภายในนิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร

2.2.1 กลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอและเส้นใย

อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อมกรดต่าง และสารปรับปรุงคุณภาพต่างๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอก เป็นต้น สิ่งที่ไม่ได้ขาดไม่ได้ คือ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณที่มากเพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ตลอดจนความพอใจความรู้สึกของผู้บริโภค (ชนิษฐา, 2550)

2.2.2 กลุ่มอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

อุตสาหกรรมที่นำผลิตผลจากภาคเกษตร ได้แก่ ผลิตผลจากพืช ปศุสัตว์และประมง มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหาร โดยอาศัยเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารและการถนอมอาหาร ตลอดจนเทคโนโลยีเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (food processing equipment) บรรจุภัณฑ์อาหาร (packaging) เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารให้ได้ปริมาณมากมาย มีคุณภาพสม่ำเสมอปลอดภัยและสะดวกต่อการบริโภคหรือการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป และเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลจากพืช ปศุสัตว์และประมง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2557)

2.2.3 กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนและส่วนประกอบของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น IC, PCB, Capacitor เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยมีการลงทุนในอุตสาหกรรมประเภทนี้สูงมาก ไม่ว่าจะเป็นการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศ การร่วมลงทุนและบริษัทในประเทศเอง ซึ่งบริษัทต่างชาติและบริษัทร่วมลงทุนจากต่างชาติ จะมีขนาดกลางและขนาดใหญ่ ส่วนมากจะใช้เครื่องจักรวัตถุดิบ รวมทั้งเทคโนโลยีจากบริษัทแม่จากต่างประเทศ ส่วนบริษัทที่เป็นของคนไทยส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กหรือไม่ก็เป็นการทำสัญญาการผลิต (subcontracting) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต

2.3.1 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมฟอกย้อม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1) สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก

โซดาไฟ (sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมัน โดยเปลี่ยนไขมันเป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัวสิ่งสกปรกต่างๆ ถูกขจัดออกง่ายขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ ต่างยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ เช่น โปรตีน เพกทิน สารลดแรงตึงผิวที่ตกค้าง เกลือแร่ต่างๆ ให้ละลายหลุดออกมา

น้ำสบู่ (detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมัน ในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน (emulsion) การกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆออกจากวัสดุ รวมทั้งป้องกันมิให้อ่อนกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกมีทั้งประจุบวกและประจุลบ แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน

สารจับโลหะ (complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์หรือคีเลต สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง โคลนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะต่างๆเกิด ตะกอน-

ไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไอออนเหล่านี้นอกจากจะพบในน้ำแล้วยังพบว่ามีมาจากวัสดุด้วย เช่น ฝ้าย เป็นต้น

2) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว

สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมเปอร์ออกไซด์ (Na_2O_2) เป็นต้น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ($NaClO$) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ($Ca(OCl)_2$) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ ($NaClO_2$) เป็นต้น

สารรีดิวซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_4$) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_6$) โซเดียมฟอร์มัลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ($HCHOHSO_2Na \cdot 2H_2O$)

2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

มอโนโซเดียมออร์โทฟอสเฟต มอโนโพแทสเซียมออร์โทฟอสเฟต เทตระโซเดียมไดฟอสเฟต เทตระโพแทสเซียมไดฟอสเฟต เพนทะโซเดียมไตรฟอสเฟต เพนทะโพแทสเซียมไตรฟอสเฟต โซเดียม-พอลิฟอสเฟต แคลเซียมพอลิฟอสเฟตโซเดียม แอลจินเนต สารกันหืน (Antioxidant) ได้แก่ โซเดียม-แอสคอร์เบต โพแทสเซียมแอสคอร์เบต

หมายเหตุ สารอู๋มน้ำในกลุ่มฟอสเฟตอนุญาตให้ใช้ได้ ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม คำนวณเป็น P_2O_5 (รวมถึงฟอสเฟตในธรรมชาติ)

2.3.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

จากรายงานมลพิษจากอุตสาหกรรมไฮเทคซึ่งทำการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ของห้องปฏิบัติการงานวิจัยกรีนพีซ มหาวิทยาลัยเอ็กซีเตอร์ สหราชอาณาจักร พบหลักฐานการปนเปื้อนด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากสารเคมีหลายชนิดในแหล่งผลิตทุกแห่ง จากการสำรวจทั้ง 3 ภาคการผลิต ซึ่งสารเคมีหลายชนิดเป็นสารที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งสารเคมีที่เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งสารเคมีบางชนิดเป็นพิษต่อมนุษย์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีการพบสารเคมีบางชนิดในแหล่งน้ำที่มากกว่าหนึ่งภาคการผลิต รวมทั้งกลุ่มของสารเคมีเป็นพิษที่ดำรงอยู่อย่างยาวนานในสิ่งแวดล้อม อาทิ โพลีโบรมิเนเตดไดฟีนิลอีเธอร์ (polybrominated diphenyl ethers: PBDEs) ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายเพื่อหน่วงการลุกติดไฟหรือที่เรียกว่า สารทนไฟประเภทโบรมีนพธาเลท (phthalates) ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) หรือเพื่อให้พลาสติกมีความนุ่มตัวทำละลายคลอรีนบางชนิดและปริมาณโลหะหนักจำนวนมาก

สารเคมีหลายชนิด (ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ถูกพบในแหล่งรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศจีนและอินเดีย (ในงานวิจัยของกรีนพีซเมื่อไม่กี่ปีมานี้) (Brigden et.al, 2005) รวมทั้งโลหะหนักบางชนิดพธาเลทและสารทนไฟโบรมีนประเภท PBDEs

การวิเคราะห์คอมพิวเตอร์ไม้ดื่กที่ถูกซื้อในยุโรปในปีค.ศ.2006 พบว่ามีส่วนประกอบซึ่งเป็นสารผสมของ PBDEs (Brigden et.al, 2006) แม้ว่าจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างไปจาก PBDEs ที่พบในแหล่งผลิต

สารเคมีชนิดอื่นที่พบในแหล่งน้ำทิ้งและในตัวอย่างน้ำใต้ดินแตกต่างกันไปในแต่ละภาคการผลิต ซึ่งแสดงให้เห็นกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น พบสารทนไฟประเภทโบรมีนชนิด TBBPA และสารเคมีเกี่ยวกับ photoinitiator เฉพาะแหล่งที่ผลิตแผงวงจรพิมพ์ ความแตกต่างเหล่านี้สะท้อนถึงกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันในแต่ละภาคการผลิต

สารทนไฟ (flame-retardants) เป็นสารเคมีที่นำไปใช้ในการผลิตวัสดุพลาสติกหลายชนิดอย่างเช่น เคสคอมพิวเตอร์ และชิ้นส่วนของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์หลายประเภทเพื่อป้องกันการลุกไหม้ กลุ่มสารเคมีที่มีการใช้อย่างแพร่หลายสองกลุ่ม ได้แก่ สารทนไฟประเภทโบรมีน เช่น PBDEs และ TBBPA และสารประกอบฟอสฟอรัส เช่น TPP

โพลีโบรมิเนตเตตไดฟีนีลอีเธอร์ (polybrominated diphenyl ethers: PBDEs) เป็นสารเคมีที่ดำรงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลายาวนาน ซึ่งบางประเภทสามารถสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมได้

พธาเลท (phthalates) นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกในการผลิตพลาสติก โดยเฉพาะในการผลิตพีวีซี เช่น การผลิตสายเคเบิลและอุปกรณ์ยืดหยุ่นชนิดต่างๆ

พบการบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพในโรงบำบัดของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งในประเทศไทย ซึ่งมีการผลิตแผงวงจรพิมพ์เช่นเดียวกับนิคมอุตสาหกรรมอื่นอีกจำนวนมาก โดยปกติแล้วโรงบำบัดน้ำเสียกลางจะได้รับของเสียที่ผสมกันจากโรงงานหลายแห่ง แม้กระบวนการบำบัดจะช่วยย่อยสลายสารเคมีบางชนิด แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับสารเคมีอินทรีย์ที่ดำรงอยู่ยาวนาน (persistent organic chemicals) และโลหะหนักในน้ำเสีย จากการศึกษาที่พบว่า สารเคมีเหล่านี้ยังคงปรากฏอยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและถูกปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นการสะสมตัวของโคลนในโรงบำบัดน้ำเสียยังทำให้น้ำที่ถูกปล่อยออกมาปนเปื้อนโลหะหนักและสารเคมีอินทรีย์ที่ดำรงอยู่ยาวนาน อย่างไรก็ตามไม่ใช่โรงงานทุกแห่งจะมีระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเหตุให้มีการพบสารเคมีเหล่านี้ในน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาโดยตรงจากโรงงานผลิตแผงวงจรพิมพ์

ทั้งนี้ยังตรวจพบสารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes: THMs) จากตัวอย่างน้ำใต้ดินบางแห่งในทุกภาคการผลิต สารเคมีเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากการใช้คลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่ง

เป็นวิธีฆ่าเชื้อโรคที่พบโดยทั่วไป อย่างเช่น ตามบ่อเปิดและอาจเป็นแหล่งกำเนิดของกลุ่มตัวอย่างสารเคมีชนิดนี้

ไธซานโธน (thioxanthenes) เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการ photoresist เพื่อผลิตแผงวงจรพิมพ์ ไม่มีข้อมูลมากนักเกี่ยวกับสารประกอบประเภทนี้ แม้เป็นที่ทราบกันดีว่าสารอนุพันธ์บางชนิดจากไธซานโธนมีอันตรายอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อมในน้ำและอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำแม้จะมีการแพร่กระจายในปริมาณที่ต่ำ

สารอินทรีย์ระเหยประเภทคลอรีน (chlorinated volatile organic chemicals: VOCs) สารคลอรีนจำพวกมีเทน (methanes) อีเทน (ethanes) และอีธีน (ethenes) จำนวนมากถูกใช้หรือเคยถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิต ทั้งในการทำความสะอาดพื้นผิวในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (แผงวงจรพิมพ์และชิปเซมิคอนดักเตอร์) โดยเฉพาะสาร 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-trichloroethane) ไตรคลอโรอีธีน (Trichloroethene) และเตตระคลอโรอีธีน (Tetrachloroethene)

โนนิลฟีนอล (Nonylphenol: NP) เป็นสารเคมีที่เกิดจากการแตกตัวของสารกำจัดคราบอย่างสารโนนิลฟีนอลอีโธซีเลท (Nonylphenol Ethoxylate: NPE) มีรายงานว่ามีการใช้เป็น Antioxidant ในพลาสติกบางชนิด

กล่าวโดยรวมแล้วผลจากการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การใช้สารเคมีอันตรายและวิธีปฏิบัติในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมด้วยสารเคมีอันตรายหลายชนิด ซึ่งบางชนิดสามารถดำรงอยู่อย่างยาวนานและสะสมตัวเพิ่มขึ้นในสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันอยู่ทั่วไปไม่สามารถกำจัดสารเคมีจำนวนมากที่ใช้ในการผลิตได้ซึ่งรวมทั้งสารทนไฟประเภทโบรมีนและโลหะหนัก (มหาวิทยาลัยเอ็กซีเตอร์สหราชอาณาจักร, 2550)

2.4 ลักษณะน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรม

2.4.1 น้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

กระบวนการฟอกย้อมเป็นการใช้สารเคมีและสีย้อมที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า การย้อมสี การตกแต่งสำเร็จและการชำระล้างทำความสะอาดเครื่องจักร รวมถึงอุปกรณ์ของแต่ละขั้นตอน นอกจากนี้ยังต้องการน้ำสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำและน้ำหล่อเย็นอีกด้วย แต่ละกระบวนการจะมีความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียที่สูง ดังนั้น น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมเกือบทั้งหมดจะกลายเป็น้ำเสียที่แตกต่างกันทั้งในด้านปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำสามารถจำแนกการใช้น้ำตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

- 1) การใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อม
- 2) การใช้น้ำในหม้อไอน้ำ
- 3) การใช้น้ำในการหล่อสี
- 4) การใช้น้ำในการทำความสะอาดเครื่องจักร
- 5) การใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค

ทั้งนี้ ตารางที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ชัดเจนว่าในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตมีการใช้วัตถุดิบใดบ้าง และวัตถุดิบแต่ละชนิดส่งผลกระทบต่อลักษณะของน้ำทิ้งอย่างไร

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อม

กระบวนการ	มลสารในน้ำทิ้ง	ปริมาณน้ำทิ้ง	ลักษณะของน้ำทิ้ง
ลอกแป้ง	แป้ง กลูโคส ซีเอ็มซี พีวีเอ เรซิน ไขมันและขี้ผึ้ง ธรรมชาติหรือสังเคราะห์	น้อย	บีโอดีสูง
ขจัดสิ่งสกปรก	โซดาไฟ ขี้ผึ้งและกรีซ โซดาแอส โซเดียม ซิลิเกต เศษเส้นใย	น้อยมาก	เป็นด่างแรง สีดำ บีโอดีสูง
ฟอกขาว	ไฮโปคลอไรท์ คลอรีน โซดาไฟ กรดไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์	น้อย	สารประกอบพวกต่าง บีโอดีประมาณ 5%
ชุบมัน	โซดาไฟ	น้อย	เป็นด่างแรง บีโอดีต่ำ
ย้อมสี	สีย้อมชนิดต่างๆ เกลือและ สารรีดิวซิ่ง เช่น ซัลไฟต์	มาก	สีเข้ม บีโอดีค่อนข้างสูง ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ซีโอดีต่ำและเกิดฟอง
การพิมพ์	สี แป้งพิมพ์ กาว ไขมัน สารที่ทำให้เกิดกรดและ เกลือโลหะ	น้อยมาก	สีเข้ม บีโอดีค่อนข้างสูง มีไขมัน
การตกแต่งสำเร็จ	แป้งเล็กน้อย สารตกแต่งที่ เหลือ เกลือ	น้อยมาก	เป็นด่างเล็กน้อย บีโอดีต่ำ ซีโอดีสูง

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2548)

2.4.2 น้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

1) น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง อาจเป็นวัตถุดิบที่ ผ่านการเตรียมเบื้องต้น (raw material preparation) เช่น คัดขนาด การล้าง (cleaning) แล่เป็นชิ้น ตัดแต่ง แกะเปลือก หรือเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า เช่น การชุบด้วยแป้ง (coating batter) การชุบเกล็ดขนมปัง (breading) ผ่านการปรุงสุก (cooking) ได้แก่ นึ่ง (steaming) ทอด (frying) หรือต้มสุกให้พร้อมนำไปแปรรูปต่อหรือนำไปประกอบอาหาร เช่น ซูริมิหลังจากการแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่เยือกแข็งจะต้องเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์และเก็บรักษาอุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส เพื่อคงความสด ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่และมีอายุการเก็บรักษาตามที่กำหนดขั้นตอนการแปรรูปอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง

1.1) การรับวัตถุดิบ การเก็บรักษาคุณภาพอาหารทะเลก่อนส่งโรงงานแปรรูป ผู้จำหน่ายจะควบคุมอุณหภูมิของอาหารทะเลให้ ต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส การลดอุณหภูมิทำโดยการใช้น้ำแข็งผสมเกลือหรือการเก็บรักษาไว้ในน้ำทะเลผสมน้ำแข็งที่เย็นจัดหรือเก็บรักษาในห้องเย็น (cold storage)

วัตถุประสงค์ของการลดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการเสื่อมเสียด้วยจุลินทรีย์ (microbial spoilage) เช่น *proteus* และป้องกันการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียก่อโรค (pathogen) และรักษาความสดของวัตถุดิบ

จุลินทรีย์ก่อโรคที่พบในอาหารทะเล *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio Cholerae* *Salmonella*, *Clostridium botulinum*, *Escherichia Coli*

1.2) การล้าง (washing) เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน และลดปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นในวัตถุดิบ การล้างทำความสะอาดวัตถุดิบอาจจะใช้น้ำสะอาดเย็นผสมคลอรีนที่ความเข้มข้นระดับประมาณ 3-5% และอาจเติมเกลือเพื่อลดอุณหภูมิของน้ำ การล้างวัตถุดิบอาจกระทำโดยการใช้วิธีจุ่มล้างในภาชนะ หรือล้างผ่านสายพานที่มีน้ำฉีดล้างบนสายพานนั้น หรือทั้งสองวิธีร่วมกับการล้างในขั้นตอนแรกน้ำที่ผ่านการล้างจะมีการเจือปนด้วยเลือดและสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ติดมากับวัตถุดิบเป็นปริมาณสูง ดังนั้นจึงต้องมีการล้างเพิ่มอีกหลายครั้ง จนกระทั่งปริมาณจุลินทรีย์ที่ติดมากับวัตถุดิบมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

1.3) การตัดแต่งชิ้นต้นปลาจะถูกส่งไปทำการตัดหัว ขอดเกล็ด คัดไส้ ดึงก้าง และอาจมีการลอกหนัง แล่เป็นชิ้น (fillet) ประเภทของปลาแช่เยือกแข็ง เช่น ปลาแล่ชนิดมีหนังและไม่มีหนัง สำหรับผลิตภัณฑ์ปลาแล่ที่มีการระบุบนฉลากว่าไม่มีก้างต้องเอาก้างออกทั้งหมด ซึ่งรวมถึงส่วนที่เป็นก้างเล็กๆ ในเนื้อปลาด้วยปลาหมึกจะถูกลอกหนัง เอากะดองออก ตัดตาและถุงหมึกก็จะถูกถอดหัว แกะเปลือก ผ่าหลัง ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

1.4) การแช่ในสารละลาย (soaking) เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัส ช่วยให้ชุ่มน้ำได้ดี โดยการแช่ในสารอุ้มน้ำ (moisture/water retention agent) ได้แก่ มอโนโซเดียมออร์โทฟอสเฟต มอโนโพแทสเซียมออร์โทฟอสเฟต เทตระโซเดียมไดฟอสเฟต เทตระโพแทสเซียมไดฟอสเฟต เพนทโซเดียมไทรฟอสเฟต เพนทโพแทสเซียมไทรฟอสเฟต โซเดียมพอลิฟอสเฟต แคลเซียมพอลิฟอสเฟต โซเดียมแอลจิเนต สารกันหืน (antioxidant) ได้แก่ โซเดียมแอสคอร์เบต โพแทสเซียมแอสคอร์เบต

1.5) การตัดแต่งขั้นสุดท้าย วัตถุดิบที่ผ่านขั้นตอนการตัดแต่งขั้นต้น ซึ่งมีการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออกไปแล้ว จะถูกตัดแต่งและแล้ให้มีลักษณะตามต้องการของลูกค้า หรือตามที่ผู้ผลิตเองกำหนด จากนั้นวัตถุดิบจะถูกล้างทำความสะอาดอีกครั้งด้วยน้ำเย็น เพื่อกำจัดเศษเนื้อจากการตัดแต่งออกให้หมด ทั้งนี้ระหว่างการตัดแต่ง อาจมีการใช้น้ำแข็งรักษาอุณหภูมิ เพื่อคงคุณภาพความสดและลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์

1.6) การคัดขนาดการคัดเกรด วัตถุดิบ จะถูกนำไปทำให้สะเด็ดน้ำก่อนทำการคัดขนาดคุณภาพ และชั่งน้ำหนัก (weighed) เพื่อบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ต่อไป

2) ปัญหากระบวนการผลิต น้ำเสียส่วนใหญ่จะเกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบและจากแหล่งอื่นๆ ได้แก่ จากการใช้เพื่ออุปโภคในสำนักงาน การชำระทำความสะอาดมือและเท้าของพนักงานปฏิบัติการ การล้างสายการผลิตและภาชนะต่างๆ

น้ำเสียส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สูง ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของเศษเนื้อเลือดปลาและไขมัน ซึ่งมีผลให้น้ำเสียมีค่า BOD ค่าของแข็งแขวนลอยและค่าน้ำมันและไขมันสูง

ปริมาณน้ำเสียจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำใช้ ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ เช่น การควบคุมความสะอาดของสินค้า รูปแบบเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูป ลักษณะการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การตัดหัวควักไส้ก่อนส่งเข้ามายังโรงงานและการใช้น้ำทำความสะอาดสายการผลิต ทั้งนี้ในการล้างวัตถุดิบหากมีการควบคุมปริมาณเชื้อในผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับต่ำ ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ในส่วนของวิธีการผลิตของแต่ละโรงงานสิ่งที่มีผลอย่างมาก เช่นกัน การแล่ตัดแต่งปลาโดยการใช้เครื่องจักร จะใช้น้ำมากกว่าการทำงานด้วยมือและในการลอกเปลือกกุ้งด้วยเครื่องจักร จะต้องใช้น้ำมากกว่าการใช้มือ 30-40% ซึ่งอาจเทียบได้กับครึ่งหนึ่งของการใช้น้ำในโรงงานแปรรูปกุ้ง (World Bank, 1984)

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งไปบำบัดยังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งอาจแตกต่างกันตามลักษณะความพร้อมในการลงทุน ลักษณะคุณภาพน้ำเสียสภาพแวดล้อมของโรงงานและปัจจัยอื่นๆ จากระบบบำบัดนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดอาจถูกถ่ายออกไปยังแหล่งน้ำสาธารณะหรือถูกกักเก็บไว้ภายในพื้นที่โรงงาน เมื่อน้ำเสียมีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ในปริมาณสูง จึงทำให้เกิดฮิวมัสและฮิวมิคขึ้นได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ฮิวมัส (Humus) คือ อินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน โดยสลายตัวปะปนอยู่ในดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ เกิดจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งสังเคราะห์ได้สารประกอบอินทรีย์จำพวกกรดอะมิโน โปรตีน และอะโรมาติก และจะเกิดการรวมตัวของสารประกอบอินทรีย์หลังจากที่จุลินทรีย์ตายลงและทับถมกันเป็นเวลานานกลายเป็นฮิวมัสในดิน

ส่วนประกอบของฮิวมัสประกอบด้วยสารผลิตภัณฑ์ (products) หลายประเภทโดยขึ้นอยู่กับชนิดของอินทรีย์วัตถุต้นกำเนิดตามธรรมชาติ เกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตในดิน รวมทั้งการแปรสภาพของสารผลิตภัณฑ์และการสังเคราะห์สารขึ้นมาใหม่

ฮิวมัสมีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีและความอุดมสมบูรณ์ โดยความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (P) จะสูงขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างฮิวมัสกับโลหะแคทไอออน Al^{3+} และ Fe^{3+} ในดินที่เป็นกรด รวมทั้งกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในดินที่เป็นด่าง ทำให้โอกาสที่แคทไอออนในดินจะทำปฏิกิริยาตกตะกอนกับ P สารละลายได้น้อย เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างซิลิเกต ในระหว่างการสลายตัวผู้พังของแร่ต้นกำเนิด

เป็นการเพิ่มประโยชน์ของจุลธาตุ (trace elements) ในดินชั้นบน เนื่องจากการดูดใช้จุลธาตุจากดินชั้นล่างโดยรากพืช เมื่อรากพืชเกิดการย่อยสลายจุลธาตุแล้วก็จะส่งผลประโยชน์ต่อพืชได้ดีขึ้น จากปฏิกิริยาคีเลตโลหะจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างฮิวมัสและอนุภาคดินเหนียวจากการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างฮิวมัสกับดิน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดและเสถียรภาพของเม็ดดิน ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมหรือต่อต้านความเข้มข้นที่สูงขึ้นหรือสูงเกินไปของโลหะแคทไอออนบางชนิด เช่น Al^{3+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อพืชได้มีบทบาทต่อเคลื่อนย้ายของโลหะบางชนิด เช่น Al^{3+} และ Fe^{3+} ลงสู่ชั้นล่างของดิน

กรดฮิวมิก (Humic Acid) เป็นสารอินทรีย์จำพวก polyphenols มีธาตุ C, H, O, N, S เป็นองค์ประกอบ และอาจมีธาตุอีกหลายธาตุเป็นองค์ประกอบรอง มีตั้งแต่สีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ กรดฮิวมิกจะเป็นส่วนของฮิวมัสหรืออินทรีย์วัตถุ กรดฮิวมิกจะมีส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ เรียกว่า reactive groups หรือ functional groups ได้แก่ carboxyl groups, aliphatic และ aromatic hydroxyl groups, carbonyl และ amide groups ซึ่งบรรดา functional groups เหล่านี้ทำให้กรดฮิวมิกมีความสามารถในการดูดธาตุประจุบวก (cations) เช่น ไอออนโลหะซึ่งทำให้เกิดตะกอนสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ซึ่งสามารถแบ่งสารอินทรีย์ต่างๆออกเป็นสองส่วน คือ

ส่วนที่ไม่เป็นสารฮิวมิก (Nonhumic Substances) ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป เช่น สารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอะมิโน ลิพิด ลิกนิน แทนนิน และกรดอินทรีย์ต่างๆ เป็นต้น ลักษณะที่สำคัญของสารอินทรีย์เหล่านี้ คือมี

มวลโมเลกุลค่อนข้างต่ำมีโครงสร้างโมเลกุลไม่สลับซับซ้อนง่ายต่อการย่อยสลายเป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในดิน

ส่วนที่เป็นสารฮิวมิก (Humic Substances) เกิดจากการแปรสภาพของสารอินทรีย์และสังเคราะห์รวมตัวขึ้นมาใหม่ของสารที่ไม่ใช่ฮิวมิก ประกอบด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์ประเภทที่มีลักษณะดังนี้ มีมวลโมเลกุลค่อนข้างสูง โครงสร้างโมเลกุลมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน แสดงสมบัติเป็นสารคอลลอยด์ คงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน

2.4.3 น้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) อุตสาหกรรมต้นน้ำ (upstream Industry) เป็นอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐานสำหรับการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น wafer fabrication, PCB's Design, IC's Design เป็นต้น โดยในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการผลิตอุตสาหกรรมต้นน้ำบางประเภท แต่ส่วนใหญ่ยังใช้เทคโนโลยีขั้นต่ำอยู่ ส่วน wafer Fabrication เป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าเพิ่มสูง แต่ประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตได้เอง

2) อุตสาหกรรมกลางน้ำ (midstream Industry) หมายถึง อุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนและส่วนประกอบของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น IC, PCB, Capacitor เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยได้มีการลงทุนในอุตสาหกรรมประเภทนี้สูงมาก ไม่ว่าจะเป็นการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศ การร่วมลงทุน และบริษัทในประเทศเอง ซึ่งบริษัทต่างชาติ และบริษัทร่วมลงทุนจากต่างชาติ จะมีขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งโดยมากแล้วจะใช้เครื่องจักร, วัตถุดิบ รวมทั้งเทคโนโลยีจากบริษัทแม่จากต่างประเทศ ส่วนบริษัทที่เป็นของคนไทยเองนั้นส่วนใหญ่แล้วจะเป็นมีขนาดเล็ก หรือไม่ก็เป็นการทำสัญญาการผลิต (subcontracting) ซึ่งกระบวนการผลิตของบริษัทจะไม่ซับซ้อนมากนัก และปัจจัยการผลิตหลักคือแรงงาน ซึ่งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมกลางน้ำที่มีมูลค่าการส่งออกสูง และมีแนวโน้มว่าจะมีมูลค่าเพิ่มขึ้นอีก ได้แก่ IC และ PCB

3) อุตสาหกรรมปลายน้ำ (downstream Industry) เป็นการผลิตสินค้าขั้นสุดท้ายของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ เครื่องรับวิทยุ และโทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตสินค้าขั้นสุดท้ายเหล่านี้ได้โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เช่น เครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ ซึ่งเรามีความชำนาญเฉพาะด้านมากกว่า 30 ปีแล้ว อย่างไรก็ตามการใช้ชิ้นส่วนภายในประเทศของอุตสาหกรรมขั้นปลายน้ำนี้ค่อนข้างน้อย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นการนำแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เช่น แผงวงจรไฟฟ้ารวม (IC) ทรานซิสเตอร์ (transistor) คาปาซิเตอร์ (capacitor) ไดโอด (Diode) ความต้านทาน (Resistor) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ มาประกอบรวมกันตาม

ตำแหน่งที่กำหนดเพื่อให้ได้แผ่นวงจรสำเร็จรูป (printed circuit board assembly : PCBA) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการ	ลักษณะของน้ำเสีย
ถ่ายภาพภายใน	สมบัติเป็นด่าง
กัดทองแดง	สมบัติเป็นกรด
ชุบทองแดง (Black/Brown oxide)	สมบัติเป็นกรดหรือด่างและมีทองแดงเจือปน
ขัดผิวทองแดง	มีฝุ่นทองแดงเจือปน
สร้างผิวทองแดงที่ผนังของรู	สมบัติเป็นกรด และมีทองแดงเจือปน
ชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า	สมบัติเป็นกรดและมีทองแดงเจือปน
ถ่ายภาพชั้นนอก	สมบัติเป็นด่าง
ชุบเพิ่มความหนาทองแดงและชุบตีบุก	สมบัติเป็นกรดและมีทองแดงเจือปน
กัดทองแดง และตีบุก	สมบัติเป็นกรดและมีทองแดงและตีบุกเจือปน
เคลือบผิวบอร์ดด้วยสี	สมบัติเป็นกรด
ชุบโลหะชนิดต่างๆ ต่อจากกระบวนการพิมพ์สัญลักษณ์	สมบัติเป็นกรดซึ่งมีโลหะชนิดต่างๆ เจือปน เช่น ทองคำนิกเกิล ตีบุก เงิน เป็นต้น
สกรับเบอร์แบบบรรจุวัสดุ	น้ำใช้หมุนเวียนในสกรับเบอร์ที่หมดสภาพการใช้งาน

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551)

จากตารางที่ 2.2 สามารถอธิบายลักษณะเฉพาะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ได้ดังนี้ น้ำเสียที่มีลักษณะสมบัติเป็นด่าง หมายถึง สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างที่ใช้แล้วทั้งหมด ซึ่งมีสารแขวนลอยประเภทไขมันและอนุเล็กๆ ของน้ำมัน อาจมีค่าพีเอชประมาณ 9 หรือมากกว่า ส่วนน้ำเสียที่มีลักษณะสมบัติเป็นกรด เกิดจากกระบวนการชุบโลหะต่างๆ และน้ำที่หมดสภาพการใช้งานจากสกรับเบอร์ที่ใช้กำจัดไอกรด อาจมีค่าพีเอชประมาณ 3 หรือน้อยกว่า ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มาจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล เป็นต้น

2.5 สมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ

2.5.1 คุณภาพน้ำ

ผู้ประกอบการโรงงานที่มีการใช้งานหม้อน้ำต้องปรับสภาพน้ำสำหรับหม้อน้ำดังนี้

1) คุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำ (Boiler feed water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ ดังนี้

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	5.8 - 9.5	-
Total Hardness	ไม่เกิน 10	ppm as CaCO ₃

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม (2549)

2) คุณภาพน้ำในหม้อน้ำ (Boiler water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ ดังนี้

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	8.5 - 11.8	-
Total Dissolved Solid (TDS)	ไม่เกิน 3,500	ppm

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม (2549)

2.5.2 สารหรือตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids)

สารหรือตะกอนแขวนลอย คือ สารหรือของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำแต่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดความขุ่น (turbidity) เป็นของแข็งส่วนที่กรองได้โดยการนำน้ำตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองชนิด glass-fiber filter แล้วอบตะกอนที่กรองได้ให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

2.5.3 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งเป็นต้นเหตุให้ไม่ใส อีกนัยหนึ่ง ความขุ่น หมายถึง ปริมาณเนื้อแห้งของสารที่อยู่ในน้ำ บ่งบอกถึงความหยาบ ละเอียด สีและรูปร่างของอนุภาคสารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ หน่วยวัดความขุ่นที่เคยใช้กันมา ได้แก่ ความขุ่นเป็น ppm เมื่อเทียบกับซิลิกา โดยความขุ่น 1 ppm (มิลลิกรัมต่อลิตร) เท่ากับ ความขุ่นของน้ำใสสะอาดที่มีซิลิกา (SiO₂) อยู่ 1 มิลลิกรัม ในน้ำ 1 ลิตร

หน่วยวัดความขุ่นที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ 3 หน่วย คือ JTU (Jackson Turbidity Unit), FTU (Formazin Turbidity Unit) และ NTU (Nephelometric Turbidity Unit) ค่าความขุ่นทั้งสามหน่วยนี้จะให้ค่าเป็นตัวเลขเท่ากัน

2.5.4 สารหรือของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Solids or Total Dissolved Solids)

สารหรือของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด คือ สิ่งที่อยู่ในน้ำทั้งหมด ทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ตรวจสอบได้โดยการระเหยตัวอย่างน้ำให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีวิธีการประมาณปริมาณ TDS ได้จากการวัดค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งค่านี้บอกถึงความสามารถที่น้ำตัวอย่างจะนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า (Ionized)

อยู่ในน้ำ พวกสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำมักจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น แม้ว่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ คือ คุณลักษณะของไอออนชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ใกล้เคียงความเป็นจริง

$$\text{ปริมาณ TDS (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \text{ค่าคงที่} \times \text{ความนำไฟฟ้า}$$

$$\text{ค่าคงที่} = 0.55 - 0.80$$

2.5.5 pH

pH เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นกรด - ด่างของน้ำว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด ค่า pH ขึ้นกับปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่แตกตัวในน้ำ

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = \log \frac{1}{[\text{H}^+]}$$

ในเมื่อ $[\text{H}^+] =$ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน โมลต่อลิตร ในน้ำบริสุทธิ์ ที่ 25 องศาเซลเซียส จะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน

$$[\text{H}^+] = 1.0 \times 10^{-7} \quad , \quad \text{pH} = 7$$

$$\text{ถ้า } [\text{H}^+] = 10^{-2} \quad , \quad \text{pH} = 2$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-10} \quad , \quad \text{pH} = 10$$

ถ้า pH น้อยกว่า 7 แสดงว่า น้ำเป็นกรด ถ้าในน้ำมีกรดเกลือละลายอยู่ 3.65 กรัมต่อลิตร จะมี pH = 1

ถ้า pH มากกว่า 7 แสดงว่า น้ำที่มีด่างโซดาไฟละลายอยู่ 40 กรัมต่อลิตร จะมี pH = 14

ค่า pH จะมีความแตกต่างไปจากความเป็นกรดหรือความเป็นด่าง เช่น กรดกำมะถันเข้มข้น 0.1 นอร์มัล กับ กรดน้ำส้มเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ซึ่งมีความเป็นกรดที่จะสะเทินต่างเท่ากัน แต่กรดกำมะถันจะมี pH = 1 กรดน้ำส้มมี pH = 3 ทั้งนี้เพราะกรดกำมะถันมีอัตราการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนสูงกว่า ค่า pH ย่อมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า pH จะลดลง

2.5.6 ความเป็นกรด (Acidity)

ความเป็นกรด หมายถึง ความสามารถของน้ำที่ทำปฏิกิริยาฆ่าฤทธิ์ของด่างได้ ซึ่งต่างกับ pH ที่เป็นการวัดค่าความเข้มข้นของกรดหรือด่างในน้ำ ความเป็นกรดของน้ำมีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์ และเกลือของกรดแก่ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำ จะได้กรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อน





น้ำที่มีความเป็นกรดที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ จะมี pH มากกว่า 4.5 ส่วนน้ำที่มีความเป็นกรดที่เกิดจากกรดอนินทรีย์ จะมี pH น้อยกว่า 4.5 ฉะนั้น จึงแบ่งความเป็นกรดออกเป็น 2 ประเภท คือ ความเป็นกรดเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide acidity) และความเป็นกรดเนื่องจากกรดอนินทรีย์ (mineral acidity)

2.5.7 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างของน้ำ คือ ความสามารถที่จะฆ่าฤทธิ์กรด ความเป็นด่างมีสาเหตุเกิดจากเกลือของกรดอ่อนและบางครั้งเกิดจากด่างอ่อนหรือด่างแก่ น้ำธรรมชาติปกติมี pH อยู่ในช่วง 6 – 8 ซึ่งเกิดจากการสมดุลทางเคมีของไบคาร์บอเนตไอออน ความเป็นด่างของน้ำประกอบด้วยไอออนต่างๆ เช่น คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) แต่ไอออนตัวอื่นๆ เช่น บอเรต (BO_3^{3-}) ซิลิเกต (SiO_3^{2-}) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) มีส่วนในค่าความเป็นด่างทั้งหมด (total alkalinity) ด้วยเช่นกัน ส่วนมากพบว่าความเป็นด่างของน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแคลเซียมและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งบางครั้งก็รวมเอาโซเดียมไบคาร์บอเนตด้วย ความเป็นด่างแสดงได้เป็น 3 แบบ คือ

1) Hydroxide or Caustic Alkalinity หมายถึง ค่าความเป็นด่างที่หาได้จากตัวอย่างน้ำที่เติมแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) แล้วไทเทรตกับกรดจนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ความเป็นด่างนี้จะเกิดจากไฮดรอกไซด์ และไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์อิสระ

2) Phenolphthalein Alkalinity (P-Alkalinity) หมายถึง ค่าความเป็นด่างที่หาได้จากการไทเทรตกับกรดจนถึง pH 8.3 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาลีน P-Alkalinity จะประกอบด้วยความเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ทั้งหมด และเนื่องจากคาร์บอเนตเพียงครึ่งหนึ่งของคาร์บอเนตทั้งหมด น้ำธรรมชาติที่มีคาร์บอนไดออกไซด์อิสระละลายอยู่จะไม่มีค่า P-Alkalinity

3) Methyl Orange Alkalinity (M-Alkalinity) ในบางครั้งเรียก ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) หมายถึง ค่าความเป็นด่างที่ได้จากการไทเทรตกับกรดจนถึง pH 4.5 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสีของเมทิลออเรนจ์ ความเป็นด่างทั้งหมดจะเกิดจากไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต และเกลือของกรดอ่อน

หมายเหตุ ถ้าหากไทเทรตกับกรดจนถึงจุดเปลี่ยนแปลงสีของฟีนอล์ฟทาลีนที่ pH 8.3 แล้ว และไทเทรตต่อจากจุดนี้จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนสีเมทิลออเรนจ์ที่ pH 4.5 จะได้ความเป็นด่างที่เกิดจากคาร์บอเนตครึ่งหนึ่งของทั้งหมด (ครึ่งที่ไม่ใช่ส่วนของ P-Alkalinity) ไบคาร์บอเนตทั้งหมด ซึ่งหากในกรณีที่มี Total Alkalinity มักเรียกความเป็นด่างอันนี้ว่า M-Alkalinity

2.5.8 ความกระด้าง (Hardness)

น้ำที่มีความกระด้างละลายอยู่จะทำให้เกิดตะกอนจับในท่อน้ำได้เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น ความกระด้างส่วนใหญ่จะเกิดจากธาตุกลุ่มที่ IIA ในตารางธาตุ ได้แก่ พวก Alkalinity Earth Metal ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะที่มีประจุบวกสอง เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สตรอนเตียม (Sr) เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ไอออน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เมื่อไอออนประจุบวกเหล่านี้จับตัวกับไอออนประจุลบบางชนิดจะเกิดเป็นความกระด้างขึ้น อะลูมิเนียมและเฟอร์ริกไอออนบางครั้งถือว่ามีส่วนก่อให้เกิดความกระด้างเหมือนกัน แต่ในสถานะของน้ำในธรรมชาติธาตุเหล่านี้ละลายในน้ำได้น้อยมากจนถือว่าไม่ปรากฏอยู่ในน้ำ

ตารางที่ 2.3 ไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำ

ไอออนประจุบวก	ไอออนประจุลบ
Ca^{2+}	HCO_3^-
Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Sr^{2+}	Cl^-
Fe^{+2}	NO_3^-
Mn^{+2}	SiO_3

ที่มา : ณรงค์ วุฑฒเสถียร (2548)

หน่วยของความกระด้างนิยมนวัดเป็น พีพีเอ็มหรือมิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป CaCO_3 การจัดลำดับความกระด้างของน้ำจัดได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลำดับความกระด้างหน่วยพีพีเอ็มในรูป CaCO_3

ความกระด้าง ppm ในรูป CaCO_3	สภาพน้ำ
0 - 50	น้ำอ่อน
50 - 100	ค่อนข้างอ่อน
100 - 150	กระด้างเล็กน้อย
150 - 250	ค่อนข้างกระด้าง
250 - 350	กระด้าง
มากกว่า 350	กระด้างมาก

ที่มา : ณรงค์ วุฑฒเสถียร (2548)

สาเหตุของความกระด้างของน้ำเกิดจากเมื่อฝนตกผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ จะละลายเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนหนึ่งไว้ในน้ำ เมื่อไหลผ่านชั้นดินซึ่งมีการสลายตัวของพืช

สีเขียวที่เกิดจากแบคทีเรียจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเช่นกัน เมื่อก๊าซนี้ละลายในน้ำก็จะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อนสลายตัวได้ง่ายและมีคุณสมบัติที่สามารถละลายหินปูน ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนตได้เกิดเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต พวกไบคาร์บอเนต (HCO_3) เหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความกระด้างเพราะสารพวกนี้ละลายน้ำได้ง่าย

ความกระด้างที่มีอยู่ในน้ำทุกประเภทรวมเรียกว่าความกระด้างทั้งหมด (total hardness) ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ความกระด้างชั่วคราว (carbonate hardness) เกิดจากเกลือไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถแก้ไขได้โดยการต้มโดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



จะเห็นว่าปฏิกิริยาการสลายตัวจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และหินปูนซึ่งไม่ละลายน้ำจะตกตะกอนเป็นตะกอนเกาะจับตามหม้อน้ำความกระด้างในน้ำจะหายไป (นิพนธ์, 2550)

2) ความกระด้างถาวร (non-carbonate hardness) คือ น้ำที่มีความกระด้างอยู่ในรูปเกลือคลอไรด์ซัลเฟตและไนเตรตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งจะไม่สลายตัวเมื่อถูกความร้อนไม่เกิดตะกอนง่าย

ปัญหาของน้ำที่มีค่าความกระด้างในด้านสุขภาพอนามัยของผู้ดื่มน้ำ มีเหตุผลทำให้น่าเชื่อว่าการดื่มน้ำที่มีความกระด้างถาวรมากๆ อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคนี้ได้ นอกจากนี้ความกระด้างจะทำให้เปลือกสบู่ในการซักล้าง เกิดปัญหาคราบตะกอนสีขาวบนพื้นผิวสุขภัณฑ์ต่างๆ หรือเกิดการอุดตันของตะกอนในเส้นท่อจ่ายน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อไอน้ำ ความกระด้างจะทำให้เกิดตะกอนในหม้อไอน้ำอีกด้วย (ปราโมช, 2552)

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นด่างและความกระด้าง

จากผลการวิเคราะห์น้ำ เมื่อทราบค่าความเป็นด่างและความกระด้าง จะสามารถคำนวณหาความกระด้างชั่วคราวและความกระด้างถาวรได้

ให้ TH = ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness)

TA = ความเป็นด่างทั้งหมด (M-Alkalinity or Total Alkalinity)

กรณี 1 ถ้า $TH \geq TA$

$$\text{Carbonate Hardness} = TA$$

$$\text{Non-carbonate Hardness} = TH - TA$$

กรณี 2 ถ้า $TH < TA$

$$\text{Carbonate Hardness} = TH$$

$$\text{Sodium Alkalinity} = TA - TH$$

ในกรณีที่มี Sodium Alkalinity ปรากฏ จะใช้ Calcium Alkalinity แทน Calcium Carbonate Hardness และ Magnesium Alkalinity แทน Magnesium Carbonate Hardness ในการแสดงความสัมพันธ์ของความเป็นด่างแบบต่างๆ

Calcium Alkalinity = Calcium Hardness หรือ TA ขึ้นอยู่กับอย่างไหนน้อยกว่ากัน

Magnesium Alkalinity = Magnesium Hardness ถ้า $TA > TH$

Magnesium Alkalinity = $TA - \text{Calcium Hardness}$ ถ้า $TH \geq TA$

Sodium Alkalinity or Residual Alkalinity = $TA - TH$

Calcium Non-carbonate Hardness = $\text{Calcium Hardness} - \text{Calcium Alkalinity}$

Magnesium Non-carbonate Hardness = $\text{Magnesium Hardness} - \text{Magnesium Alkalinity}$

Total Non-carbonate Hardness = $TH - TA$

หมายเหตุ 1. ปกติน้ำจะไม่มี Sodium Alkalinity เว้นแต่ถ้ามี Magnesium Alkalinity ปรากฏอยู่

2. สำหรับกรณีทั่วไปวิธีที่ดีกว่า คือ ให้ถือว่าไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) จะจับกับแคลเซียมก่อนกลายเป็นความเป็นด่างแคลเซียม ต่อมาจึงจะจับกับแมกนีเซียมเป็นความเป็นด่างแมกนีเซียม ถ้ายังมีความเป็นด่างเหลืออยู่ ให้คิดว่าจับกับโซเดียมเป็นความเป็นด่างโซเดียมโดยลำดับ

2.7 การเกิดตะกอน

สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดตะกอนมี ดังนี้ (ปริญา, 2553)

2.7.1 ของแข็งแขวนลอยในน้ำ (Suspended Solids)

ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวก ทราาย โคลน และเศษวัสดุที่เจือปนอยู่ในน้ำ น้ำที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้ถูกต้องจะมีสารแขวนลอยหลุดมาในระบบการใช้งาน ซึ่งจะเกาะตามผิวโลหะต่างๆ

2.7.2 สารละลาย (Dissolved Solids)

ตะกอนส่วนใหญ่ที่เกิดจากสารละลาย ได้แก่ สารจำพวกคาร์บอเนต (CO_3), ซัลเฟต (SO_4) และซิลิกา (SiO_2) โดยความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของน้ำมีผลให้เกิดตะกอนมากหรือน้อย เช่น การตกตะกอนของ CaCO_3 คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ CaCO_3 จะเกิดการตกตะกอนมากกว่าการละลายน้ำ

2.7.3 จุลินทรีย์ (Microorganism)

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ ได้แก่ พวกแบคทีเรีย ทำให้เกิดเมือกหนาเกาะติดทั้งภายนอกและภายในท่อ เช่น พวก *Nitrifies* และ *Sulfate Reducers* เป็นสาเหตุทำให้เกิดสนิม เชื้อรา (Fungi) ทำให้เกิดสีตามผิวของโลหะ และสาหร่าย (Algae) จะจับกันเป็นแผ่นและทำให้เกิดการอุดตัน

2.8 ประเภทของตะกรันชนิดต่างๆ

2.8.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (ณรงค์ วุทธเสถียร, 2548)

แคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซด์ เป็นตะกรันที่มีลักษณะเป็นผลึกเม็ดขนาดใหญ่ แต่หากมีสิ่งเจือปน (Impurities) อยู่ในผลึก ผลึกจะมีรูปร่างเป็นเม็ดเล็กๆขนาดใกล้เคียงกัน ตะกรันหรือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการจับตัวและตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ตามสมการ 2.6



ที่อุณหภูมิ 25 °C (77°F) แคลเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำกลั่นที่มีความดันย่อย (partial pressure) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 3.2×10^{-4} บรรยากาศ (atm) ได้ 0.053 กรัมต่อลิตร แสดงว่าแคลเซียมคาร์บอเนตละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย แต่ค่าการละลายขึ้นกับค่าความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและปริมาณสารบางชนิดในน้ำ เช่น เกลือ (NaCl)

การที่ตะกรันหรือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากน้ำทุกประเภทมีสภาพความเป็นต่าง ซึ่งความเป็นต่างจะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนต เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอเนตไอออน คาร์บอเนตไอออนจะจับกับแคลเซียมไอออนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตตามสมการข้างต้น จนกระทั่งน้ำมีแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่มากจนกระทั่งทำให้ผลคูณของการละลาย (solubility product) ของ CaCO_3 มีค่าเกินกว่าค่าที่สามารถมีอยู่ในน้ำโดยไม่ตกผลึกออกมา จึงสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนหรือตกผลึกได้ และในขณะเดียวกันคาร์บอเนตไอออนบางส่วนจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.7



2.8.2 แมกนีเซียมคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์

ตะกอนและตะกรันแมกนีเซียมที่พบเห็นปกติเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) การละลายของแมกนีเซียมคาร์บอเนตในน้ำขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับในกรณีแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2.8



แมกนีเซียมคาร์บอเนตละลายในน้ำกลั่นได้ 0.223 กรัมต่อลิตร ซึ่งละลายได้มากกว่า แคลเซียมคาร์บอเนต 4 เท่า แสดงให้เห็นว่าตะกอนแมกนีเซียมคาร์บอเนตก่อให้เกิดปัญหาน้อยกว่า แคลเซียมคาร์บอเนต โดยปกติ น้ำที่มีแมกนีเซียมจะมีแคลเซียมอยู่ด้วย ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่จะทำให้แมกนีเซียมคาร์บอเนตละลายน้ำได้น้อยลงจะทำให้การละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตลดลงได้เช่นกัน ซึ่งทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตแตกตัวตกตะกอนออกมา ปริมาณคาร์บอเนตไอออนในน้ำลดลงเช่นกัน มีข้อยกเว้นในกรณีที่น้ำจากสองแหล่งมาผสมกัน หากน้ำชนิดหนึ่งมีแมกนีเซียม แคลเซียม และคาร์บอเนตไอออนสมดุลกัน ไปผสมกับน้ำอีกชนิดหนึ่งที่มีปริมาณแมกนีเซียมสูง จะทำให้แมกนีเซียมคาร์บอเนตแตกตัวมาตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

ปกติ น้ำที่มีแคลเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอเนต แคลเซียมคาร์บอเนตจะจับตัวและตกตะกอนได้จนถึงอุณหภูมิ 82 °C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้จนใกล้จุดเดือดของน้ำ แมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะสลายตัวเป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ Brucite ดังสมการที่ 2.9 การละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



2.8.3 แคลเซียมซัลเฟต

แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมมักเกาะบนพื้นผิวโลหะในท่อเป็นตะกอนมากกว่าจะเกิดเป็นตะกอนหรือสลัดจ์ ซึ่งผลึกของแคลเซียมซัลเฟตมีขนาดเล็กกว่าผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนจึงมีเนื้อแน่นและแข็งกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ปฏิกริยาจึงจับตัวตกตะกอน ดังสมการที่ 2.10



แคลเซียมซัลเฟตละลายในน้ำกลั่นได้ 2.09 กรัมต่อลิตรที่ 25 °C ดังนั้น ตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจะตกตะกอนหลังตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะการละลายในน้ำแตกต่างกันมาก แคลเซียมซัลเฟตพบได้ใน 3 รูปแบบ คือ

- 1) Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- 2) Hemi-hydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
- 3) Anhydrite, CaSO_4 ที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปยิปซัมและแอนไฮไดรต์เท่านั้น

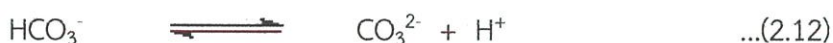
2.8.4 เหล็ก

ตะกอนเหล็กเกิดได้จากสองแหล่งคือ ในแหล่งน้ำที่มีเหล็กละลายอยู่ อีกแหล่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็ก เหล็กที่ตกตะกอนจากทั้งสองสาเหตุนี้จะเกาะเป็นตะกอนบนโลหะอยู่ในน้ำ ในรูปของสารคอลลอยด์ น้ำที่มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในสภาพคอลลอยด์ จะมีสีแดงของสนิมเหล็กแต่หากเป็นน้ำที่มีเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ในสภาพคอลลอยด์จะมีสีดำ ตะกอนเหล็กซัลไฟด์อาจอยู่ในรูป Kansite (Fe_9S_8), Pyrrhotite ($\text{Fe}_{0.875}\text{S}$) และ Pyrite (FeS_2)

น้ำที่มีก๊าซออกซิเจนละลายอยู่จะกัดกร่อนเหล็ก ทำให้เกิดตะกรันเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ หากน้ำมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่เมื่อเกิดการกัดกร่อนเหล็กจะ ได้ตะกรันเฟอร์รัสคาร์บอเนต ในแหล่งน้ำธรรมชาติเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) หรือเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ตะกรันที่เกิดจากเหล็กละลายอยู่ในน้ำ ได้แก่ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3), เฟอร์รัสคาร์บอเนต (FeCO_3), เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS), เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)

2.9 ตะกรันและดัชนีทำนายการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

ตะกรัน เกิดจากสารละลายที่มีเกลือของแร่ธาตุต่างๆตกผลึกแยกออกจากน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็น จำพวกหินปูน อาจมีสารอินทรีย์อุดตันรวมอยู่ด้วย จะเกาะและพอกพูนในท่อน้ำหรือถังเก็บน้ำ มีลักษณะเป็นรูปผลึกของแข็งผสมกันคล้ายกับซีเมนต์ พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ตะกรันที่เกาะกัน ด้านในกาต้มน้ำ เนื่องจากน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติมีแร่ธาตุมากมายเจือปน แร่ธาตุที่ก่อตัวเป็นตะกรัน อาทิ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมฟอสเฟต ซิลิกา ไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ของ เหล็ก และแมกนีเซียม เป็นต้น สามารถบ่งบอกสภาพการละลายของเกลือในน้ำได้ว่ามากหรือน้อย เพียงใดด้วยค่าผลคูณของการละลายของเกลือชนิดนั้นๆเช่น Ca^{2+} กับ SO_4^{2-} เมื่อใดที่เกลือแคลเซียมซัลเฟต (calcium sulphate, CaSO_4) ละลายอยู่มากจนทำให้ผลคูณของการละลายเกินกว่าค่าคงที่ของการละลาย (solubility product constant, K_{sp}) ซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด เกลือ CaSO_4 จะแยกตัวตกผลึกและก่อตัวเป็นตะกรัน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พีเอช (pH) ความดัน การระเหยของน้ำหรือการเติมผลึกของแข็งเจือปนเข้าไป จะมีอิทธิพลต่อการละลายได้มากขึ้นหรือน้อยลง หรือตกผลึกแยกตัวออกมา เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะ เช่น ต้มน้ำ เมื่อน้ำระเหยทำให้ความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้น สามารถทำนายการเกิดตะกรันได้โดยทราบปริมาณของเกลือตั้งต้นแล้ว พิจารณาผลคูณของการละลายของเกลือ แต่กรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถทำนายการเกิด ตะกรันด้วยค่าผลคูณของการละลายของเกลือแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต ในน้ำจะมีปฏิกิริยาสมดุลระหว่างคาร์บอเนตกับไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไบคาร์บอเนตกับกรดคาร์บอนิก ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



น้ำที่ใช้ในครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมมาจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีความเป็นด่างของไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity) และมีค่าพีเอชน้อยกว่า 8.2 ในสภาวะดังกล่าวที่แคลเซียมไบคาร์บอเนต (calcium bicarbonate) ละลายน้ำ เมื่อนำน้ำมาใช้โดยสภาวะเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือเมื่อน้ำเป็นด่างมากขึ้น แคลเซียมไบคาร์บอเนตจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียม-

คาร์บอเนตซึ่งละลายน้ำได้น้อยกว่า ตกผลึกแยกตัวออกจากน้ำ ปฏิกริยาปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยไปคาร์บอเนตถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอเนตมากขึ้น อีกนัยหนึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาวะกระทบต่อ สมดุลระหว่างคาร์บอเนตและไปคาร์บอเนต ดังนั้น นิยมใช้ค่าดัชนีในการทำนายการเกิดตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต อาทิ Langelier Saturation Index, Ryznar Stability Index และ Stiff and Davis Stability Index ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าพีเอช ความเป็นต่าง แคลเซียมและสารละลายทั้งหมด ตลอดจนอุณหภูมิ การก่อตัวของตะกอน (nucleation) อาจเกิดที่ผิวท่อที่มีชั้นบางๆ ของสนิมหรือ บริเวณผิวที่ไม่เรียบ มีเมือกเกาะ การเติบโตของแบคทีเรียเป็นจุดเริ่มของการก่อตัวที่ผิวสัมผัสได้ เช่นกัน

นอกจากนี้ยังต้องมีเวลาเพียงพอที่น้ำจะสัมผัสกับจุดก่อตัว (nucleating site) เพื่อให้เกิดตะกอน อย่างไรก็ตามสามารถห้วงอัตราเร็วของการเกิดตะกอนได้ แม่น้ำจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยังยวด หรือ ยับยั้งการเกิดตะกอนได้โดยการเติมสารหน่วงการเกิดตะกอน (scale inhibitor) หรืออาจจะปรับ สภาพน้ำ ตลอดจนปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อการเกิดตะกอน เช่น การปรับพีเอชโดยการเติมกรด ซึ่งมีผล ทำให้เกลือของแคลเซียมละลายน้ำได้มากขึ้น ปัญหาตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบต่างๆของโรงงาน อุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เนื่องมาจากเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เช่น การเกิด ตะกอนในระบบน้ำหล่อเย็น การเกิดตะกอนสะสม อาจก่อปัญหาการอุดตันตามอุปกรณ์ ท่อส่งน้ำ และ หากเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องระเหย ตะกอนจะกลายเป็นฉนวนก่อกำเนิดปัญหาในการถ่ายเทความร้อน เมื่อตะกอนพอกหนาขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจรุนแรงถึงขั้นระเบิดได้ ถ้าไม่มีการแก้ไขและป้องกันตลอดจนขาดการดูแล/บำรุงรักษาอย่างถูก วิธี ดังนั้นจำเป็นต้องทราบแนวโน้มของการเกิดตะกอน เพื่อป้องกันมิให้ส่งผลกระทบต่อ ระบบ/อุปกรณ์ และความปลอดภัย ดัชนีที่นิยมใช้ในการทำนายการเกิดตะกอน มีรายละเอียด ดังนี้

2.9.1 ดัชนีแลงเกิลียร์ (Langelier Saturation Index)

การคำนวณหาค่า Langelier Saturation Index (LSI) เพื่อทำนายการเกิดตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต

$$LSI = pH - pH_5 \quad \dots(2.13)$$

โดย pH คือ pH ที่แท้จริงของน้ำหรือสารละลายที่ต้องการทราบว่าจะเกิดตะกอน หรือมี สภาพการกัดกร่อน และ pH_5 คือ pH ที่สภาวะอิ่มตัว และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$pH_5 = pCa + pAlk + C \quad \dots(2.14)$$

เมื่อ pCa = Calcium Hardness Factor

$pAlk$ = M- alkalinity Factor

C = Total Dissolved Solid Constant ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำ

เมื่อหาค่า LSI = 0 หมายถึง อยู่ที่จุดสมดุล คือ ไม่เกิดตะกรัน และมีการกัดกร่อนน้อยที่สุด หากค่า LSI มีค่าเป็นบวก (LSI = +) ซึ่ง $pH > pH_5$ $CaCO_3$ อยู่ในสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด ที่ภาวะ alkalinity และ total dissolved solid (TDS) ณ อุณหภูมินั้น หมายถึง มีแนวโน้มในการเกิดตะกรัน และเมื่อค่า LSI มีค่าเป็นลบ (LSI = -) ซึ่ง $pH < pH_5$ แคลเซียมคาร์บอเนตจะละลายน้ำ ซึ่งทำนายได้ว่าอยู่ในสภาพกัดกร่อนหากไม่มีการป้องกัน การทำนายคุณสมบัติของน้ำว่าจะเกิดตะกรันหรือไม่แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 โดยค่าดัชนี LSI เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปแต่ไม่สามารถชี้วัดว่าจะเกิดตะกรันอย่างแน่นอนหรือเกิดรวดเร็วเพียงใด โดยเฉพาะในน้ำที่มีค่าพีเอชสูงมาก ค่า LSI เป็นบวก คือ มีค่าประมาณ +1 แต่ก็พบปัญหาการกัดกร่อนในเส้นท่อได้

ตารางที่ 2.5 การทำนายการเกิดตะกรัน/การกัดกร่อน ด้วยค่า Langelier Saturation Index

Langelier Saturation Index (LSI)	แนวโน้มของคุณสมบัติของน้ำ
+2.0	เกิดตะกรัน และไม่กัดกร่อน
+0.5	เกิดตะกรันเล็กน้อย และไม่กัดกร่อน
0.0	สมดุล แต่อาจกัดกร่อนเล็กน้อย
-0.5	กัดกร่อนเล็กน้อย และไม่เกิดตะกรัน
-2.0	กัดกร่อนสูง และไม่เกิดตะกรัน

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2557

2.9.2 ดัชนีไรนาร์ (Ryznar Stability Index)

Ryznar Stability Index เป็นดัชนีที่ได้จากข้อมูลเชิงประจักษ์ (empirical data) และได้รับการปรับปรุงมาจาก LSI โดยรวบรวมข้อมูลจากการเดินระบบและประสบการณ์ในด้านการเกิดตะกรันและสภาพการกัดกร่อน เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างของน้ำจากสองแหล่งที่มีค่าความกระด้างต่ำ (hardness) และน้ำที่มีค่าความกระด้างสูง จะมีค่า LSI เท่ากัน

$$RSI = 2 pH_5 - pH \quad \dots(2.15)$$

การคำนวณหาค่า Ryznar Stability Index (RSI) เพื่อทำนายการเกิดตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถทำนายคุณสมบัติของน้ำจากค่า Ryznar Stability Index ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การทำนายการเกิดตะกรัน/การกัดกร่อน ด้วยค่า Ryznar Stability Index

Ryznar Stability Index (RSI)	แนวโน้มของคุณสมบัติของน้ำ
4.0-5.0	เกิดตะกรัน
5.0-6.0	เกิดตะกรันน้อย
6.0-7.0	เกิดตะกรัน เล็กน้อย
7.0-7.5	กัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ
7.5-9.0	กัดกร่อนมาก
9.0 และสูงกว่า	กัดกร่อนรุนแรงมาก

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2557

2.9.3 Stiff and Davis Stability Index

Stiff and Davis Stability Index (SDI) พัฒนามาจาก Langelier Saturation Index เพื่อใช้ในการทำนายการเกิดตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำที่มี TDS สูง

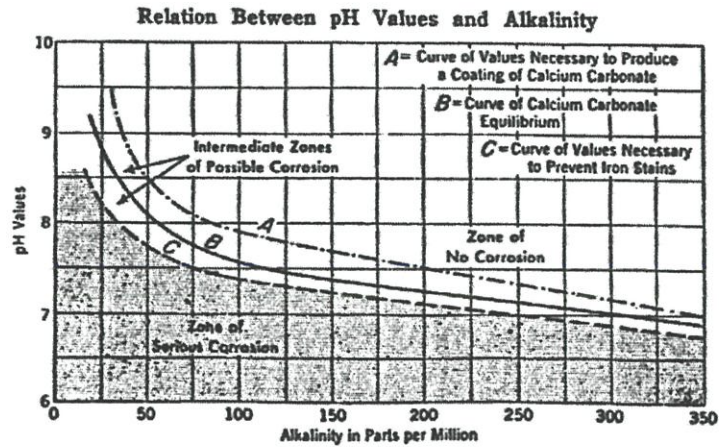
$$SDI = pH - pCa - pAlk - K \quad \dots(2.16)$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับ Ionic strength และ อุณหภูมิ

ปัจจุบันยังคงนิยมใช้ดัชนีคุณภาพน้ำทั้งสามแบบ เพื่อการทำนายการเกิดตะกรันอันเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเบื้องต้น ดังเช่น การใช้ LSI ในการทำนายการเกิดตะกรันบนผิวเมมเบรน (membrane) เพื่อการออกแบบเครื่องกรองน้ำระบบรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis system, RO) อย่างไรก็ตามการที่จะเกิดตะกรันหรือการกัดกร่อน ควรให้ความสนใจเรื่องชนิดของไอออนในสารละลายทั้งหมดด้วย เนื่องจากไอออนบางตัวจะส่งเสริมการกัดกร่อนอย่างรุนแรงร่วมด้วย

2.9.4 Baylis curve

กราฟเบย์ลิสเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้พิจารณาค่าพีเอชและสภาพต่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเพื่อไม่ให้เกิดน้ำในสภาพกัดกร่อน ทำโดยการพล็อตค่าพีเอชและสภาพต่างของน้ำลงบนกราฟ เส้นโค้งที่ได้จะแสดงผลให้เห็นว่า น้ำมีฤทธิ์กัดกร่อนหรือไม่ หากจุดของพีเอชและสภาพต่างอยู่ด้านล่างของเส้นโค้ง (พื้นที่สีเทาเข้ม) น้ำมีสภาพเป็นกรดและสามารถกัดกร่อนถึงหรือท่อโลหะในระบบ หากจุดของพีเอชและสภาพต่างอยู่เหนือเส้นโค้ง น้ำไม่มีคุณสมบัติในการกัดกร่อน แต่มีปริมาณของสภาพต่างที่มากเกินไป ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวของตะกรันในเส้นท่อ เมื่อเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการไหลของน้ำในระบบ อย่างไรก็ตามจุดอยู่เหนือเส้นประ (เส้น C) ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าน้ำจะมีความเสถียรและไม่ก่อปัญหาทางด้านกรกัดกร่อน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟเบย์ลิส

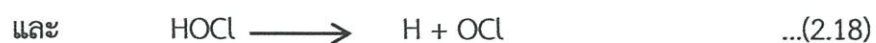
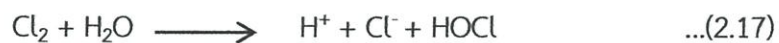
ที่มา : <http://www.ragsdaleandassociates.com/>, 2543

2.10 การป้องกันตะกรันที่เกิดจากสารแขวนลอย

การป้องกันตะกรันที่เกิดจากรสารแขวนลอย ทำได้โดยการกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น การเติมเคมีกวนผสมกับน้ำและทำให้ตกตะกอนแล้วจึงผ่านกระบวนการกรองน้ำ (filtration) เพื่อกำจัดสารแขวนลอยในน้ำ

2.11 การป้องกันตะกรันที่เกิดจากจุลินทรีย์

การตกตะกอนและการกรองน้ำสามารถกำจัดสารจุลินทรีย์ออกจากน้ำไปได้ส่วนหนึ่งหรืออาจใช้การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมคลอรีนลงในน้ำ คลอรีนที่ใช้อยู่อาจเป็นก๊าซคลอรีนหรือคลอรีนน้ำ (NaOCl มีคลอรีน 12-15%) เมื่อคลอรีนละลายน้ำจะเกิดการแตกตัว ดังปฏิกิริยา 2.17 และ 2.18



กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียต่างๆ สูงกว่าเกลือไฮโปคลอไรท์ (OCl) และค่า pH ต่ำกว่า 7.0 คลอรีนส่วนใหญ่อยู่ในรูป HOCl ซึ่งกรด HOCl ในน้ำจะทำปฏิกิริยารวมกับสารอื่นๆ เช่น แอมโมเนียรวมตัวกันเป็นเกลือคลอรีนที่เหลือ (Combined Chlorine Residual) และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารอื่นจนหมดยังคงมีคลอรีนอิสระ (Free Chlorine Residual) หลงเหลืออยู่ ประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรียคลอรีนอิสระมีสูงกว่าเกลือคลอรีน

2.12 หลักการป้องกันและควบคุมการเกิดตะกรัน

ตะกรันเป็นผลที่เกิดจากการตกผลึกของสารประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำ การหมุนเวียนน้ำในลักษณะที่ทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น เช่น ที่เกิดขึ้นกับระบบหม้อไอน้ำหรือระบบหล่อเย็น เป็นเหตุให้มีการตกผลึกเกิดขึ้น สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดจะตกผลึกก่อน สารประกอบใดที่มีผลคูณของความเข้มข้นของไอออนที่เกิดจากการแตกตัวสูงกว่าค่า Solubility Product (ผลคูณของการละลาย) สารนั้นจะเกิดการตกผลึก ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลคูณของการละลายเท่ากับ 4.82×10^{-9} หมายความว่า ถ้าค่าของ $[Ca^{2+}] \times [CO_3^{2-}]$ สูงกว่า 4.82×10^{-9} แคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดการตกผลึก เป็นต้น สารประกอบต่างๆ มีค่าผลคูณของการละลายแตกต่างกัน ทั้งนี้หากต้องการป้องกันการเกิดตะกรันควรทำให้ค่าผลคูณของความเข้มข้นของไอออนแตกต่างน้อยกว่าค่า Solubility Product ซึ่งจะช่วยลดการเกิดผลึกของสารละลายได้หรือแม้แต่การควบคุมระดับของไอออนและสารประกอบหรือการเลือกใช้สารเคมีที่มีความสามารถละลายน้ำสูง (ค่า Solubility Product สูง) อาจช่วยป้องกันการตกผลึกได้เช่นกัน นอกจากนี้ตะกรันที่เกิดขึ้นอาจเป็นตะกรันแข็งหรือเหลวก็ได้ ตัวอย่างเช่น ตะกรันของซิลิกา เป็นตะกรันแข็งที่จับแน่นบนผิวโลหะ ส่วนตะกรันของแคลเซียมไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (Calcium Hydroxy Apatite) เป็นตะกรันหรือตะกอนเหลวซึ่งไม่จับแน่นบนโลหะ เป็นต้น (มันลิน, 2545) หากสามารถสร้างตะกรันเหลวให้เกิดขึ้นแทนตะกรันแข็งได้ ตะกรันจะไม่ก่อความยุ่งยากแก่ระบบหม้อไอน้ำ ระบบหล่อเย็นหรือแม้กระทั่งระบบการหมุนเวียนน้ำในท่อ วิธีการในการควบคุมและป้องกันตะกรันแสดงใน ตารางที่ 2.7 ดังนี้

ตารางที่ 2.7 Summary of chemical and non-chemical treatment options

Option	Mechanism	Reported effectiveness
Ion exchange softening	Removes scale forming calcium species	100% scale control
Acid dosing	Changes calcium carbonate solubility	100% scale control, although corrosion issues
Chemical inhibitors	Block growth sites stopping crystal formation	Up to 100% achievable but dependent on chemical type, water quality and dose
Metal ions	Block growth sites or react with carbonate	80% reduction
Magnetic conditioners	None agreed	80% reduction
Electronic conditioners	Preferential formation of particles in bulk	40% reduction
Electrolytic	Release inhibitory metal ions in to solution	30% reduction
Ultrasound	Local pH changes induce precipitation	65% reduction
Surface modification	Produce lower fouling surface	90% achievable

ที่มา : MacAdam, J., Parsons, S.A. (2004)

2.12.1 การระบายน้ำเข้มข้นออกทิ้ง

หลักการข้อแรกในการป้องกันตะกรันไม่ว่าจะเป็นในระบบใดก็ตาม คือ ต้องมีการระบายน้ำเข้มข้นออกทิ้งบ้างเพื่อเป็นการลดปริมาณสารต่างๆ ในน้ำของระบบหมุนเวียน การกระทำดังกล่าวจะช่วยให้โอกาสและแนวโน้มในการตกผลึกลดลง

2.12.2 การกำจัดต้นเหตุของตะกรัน

ต้นเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งของตะกรัน คือ ความกระด้างในน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียม การเปลี่ยนแปลงสมดุลของน้ำทำให้สารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมตกผลึกอย่างรวดเร็วกว่าสารตัวอื่นๆ ดังนั้น การกำจัดความกระด้างจึงเป็นการป้องกันการตกผลึก ซึ่งเป็นสาเหตุนำไปสู่การสร้างตะกรัน อย่างไรก็ตามการกำจัดความกระด้างมักเป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายสูง

สำหรับการควบคุมตะกอนของระบบหล่อเย็น โดยเฉพาะระบบแบบเปิดที่ใช้น้ำเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้ เนื่องจากระบบดังกล่าวต้องใช้น้ำจำนวนมาก แต่สำหรับระบบหม้อไอน้ำ การกำจัดความกระด้างมัก เป็นวิธีปรุงแต่งน้ำภายนอกระบบหม้อไอน้ำที่นิยมปฏิบัติกันโดยทั่วไป

2.12.3 การสร้างสารประกอบที่ตกผลึกได้ยาก

เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบที่ตกผลึกได้ง่ายที่สุด ดังนั้น การป้องกันการเกิดสารแคลเซียมคาร์บอเนตจึงเป็นการทำให้การตกผลึกเกิดขึ้นช้าลง การเติมกรดกำมะถันสามารถ เปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (ซึ่งสลายตัวกลายเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตได้) ให้กลายเป็นแคลเซียม-ซัลเฟต ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่ต่ำกว่า 100 เท่าที่อุณหภูมิ ดังนั้น แนวโน้มในการตกผลึกจึงลดลง

2.12.4 การป้องกันมิให้ผลึกจับตัวเป็นตะกอน

การเติมสารโพลีเมอร์บางอย่างสามารถป้องกันมิให้ผลึกที่เกิดขึ้นเกาะกับผิววัสดุ กลายเป็นตะกอนแข็ง สารโพลีเมอร์เหล่านี้อาจมีกลไกแตกต่างกันในการป้องกันตะกอน สารประกอบ โพลีเมอร์ ในที่นี้หมายถึง สารอินทรีย์สังเคราะห์ที่ประกอบด้วย โมเลกุลชนิดเดียวกันต่อกันยาวๆ สาร โพลีเมอร์บางชนิดเป็นสารห้ามตะกอนที่ดีกว่าสารอ็อกซิก ตัวอย่างของสารโพลีเมอร์ ได้แก่ polyacryin acid, polymethacrylic acid และ polymaleic anhydride ความสามารถในการ ป้องกันการเกิดตะกอนของสารโพลีเมอร์ เกิดขึ้นเนื่องจากมันสามารถทำให้ผลึกของสารตะกอนบิด เบี้ยวไปจากสภาพปกติ จนไม่อาจจับเป็นตะกอนได้ ด้วยเหตุนี้สารโพลีเมอร์จึงทำให้ผลึกสารตะกอน กระจายตัวเป็นตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำ สารประกอบฟอสเฟตมีความสามารถคล้ายกับสารโพลี เมอร์ เพราะสามารถสร้างตะกอนของเหล็กได้โดยทำให้เหล็กกระจายตัวอยู่ในน้ำ โดยไม่เกิดผลึกหรือ ตะกอน

2.12.5 การทำให้ผลึกละลายน้ำ

สารที่เรียกว่า คีแลนต์ (chelant) มีความสามารถในการแย่งทำปฏิกิริยากับไอออนของ โลหะ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและทองแดง ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำ ได้สูงเมื่อไอออนของโลหะถูกแย่งไปทำปฏิกิริยา ผลึกธรรมชาติจึงไม่อาจเกิดขึ้นทำให้ปริมาณการเกิด ตะกอนลดลง

2.12.6 การสร้างตะกอนเหลว (หรือตะกอน)

เนื่องจากตะกอนเป็นสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ แต่อาจเลือกชนิดให้เกิดขึ้นได้โดยการเติม สารเคมีบางชนิด ดังนั้น วิธีควบคุมตะกอนแบบหนึ่ง คือ ปล่อยให้มิตะกอนเหลวเกิดขึ้นแทนตะกอน แข็งซึ่งกำจัดได้ยาก เช่น การเติมฟอสเฟตเพื่อสร้างตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกซีแอฟฟาไทท์ (Calcium Hydroxy Apatite) ซึ่งเป็นตะกอนเหลวที่อาจระบายออกจากกันหม้อไอน้ำได้โดยง่าย

นอกจากนี้การเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติบางชนิด เช่น ลิกนิน แทนนิน แป้ง สามารถช่วยทำให้ผลึกไม่รวมตัวและไม่เกาะกับผิววัสดุ (มันสิน, 2545)

การเกิดตะกอนหลักเลี้ยงได้ยาก เพราะน้ำในธรรมชาติมีส่วนประกอบที่เอื้ออำนวยต่อการตกผลึกและสร้างตะกอน ตะกอนส่วนใหญ่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ซึ่งการตกผลึกไม่นับเป็นปัญหาที่แท้จริง หากผลึกดังกล่าวแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่จับกับผิวโลหะและสร้างเป็นตะกอน ปัญหาเรื่องตะกอนในหม้อไอน้ำหรือในที่อื่นๆ เกิดขึ้นเพราะแคลเซียมและแมกนีเซียมรวมตัวกับคาร์บอเนตและซัลเฟต ทำให้เกิดการตกผลึกเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ (ดูปฏิกิริยาที่แสดงข้างล่างในตารางที่ 2.8) ซึ่งรวมถึงซิลิเกตที่สามารถสร้างตะกอนได้เช่นกัน ถ้ามีซิลิกาอยู่ในน้ำในระดับที่เกินกว่าความสามารถในการละลาย ตะกอนที่เกิดจากซิลิกาและซิลิเกตจะก่อให้เกิดปัญหามากกว่าตะกอนคาร์บอเนตและซัลเฟตเพราะเป็นตะกอนที่แข็งและจับตัวกันแน่น

ตารางที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำ

ไอออนบวกที่ละลายน้ำ	+	ไอออนลบที่ละลายน้ำ	เกลือที่ไม่ละลายน้ำ
Ca^{2+}	+	CO_3^{2-}	CaCO_3
Ca^{2+}	+	SO_4^{2-}	CaSO_4
Mg^{2+}	+	CO_3^{2-}	MgCO_3

ที่มา : มันสิน (2545)

2.13 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมและให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคณากรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมโดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

2.1 ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

2.2 ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่า ดังนี้

2.2.1 ค่าทีดีเอสไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงาน อุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่าง จากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4 โลหะหนัก มีค่าดังนี้

2.4.1ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.6 โครเมียม (Chromium)

1) Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5 ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6 ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.7 ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8 สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.9 คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.10 เพสตีไซด์ (Pesticide) ต้องไม่มี

2.11 อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส

2.12 สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

2.13 กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

2.14 น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้อง ไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.15 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้อง ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.16 ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้อง ไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.17 ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ต้อง ไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539)

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประจวบ (2554) ทำการศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำบาดาลที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง บริเวณหมู่ที่ 5 ตำบลหนองหญ้าอำเภอมืองจังหวัดกาญจนบุรี พบว่า เป็นน้ำบาดาลที่มีค่าความกระด้างสูงมาก (>450 mg/l as CaCO_3) ชนิดน้ำกระด้างชั่วคราวภายหลังจากการนำน้ำบาดาลนี้ขึ้นมาใช้เกิดปัญหาการก่อตัวของก้อนตะกรันหินปูนในท่อส่งน้ำ อาศัยหลักดัชนีการอิมตัวโดยใช้ปูนขาว (Lime Softening) ในอัตราที่แตกต่างกัน 8 ระดับ คือ 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าความกระด้างของน้ำลดลงเป็น 173.3, 154.3, 142.4, 134.7, 91.6, 107.4 และ 146.7 mg/l as CaCO_3 ตามลำดับ และอัตราที่เหมาะสมในการใช้ปูนขาวอยู่ในช่วง 450-600 มิลลิกรัมต่อลิตร

พิพัฒน์ (2556) ศึกษาผลของการใช้เครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้าต่อการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตกับน้ำที่มีแนวโน้มในการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตสูง โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบการทดลองการควบคุมและระบบการทดลองที่ใช้เครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้า โดยทั้ง 2 การทดลองได้จำลองพารามิเตอร์ ความกระด้างแคลเซียม สภาพต่าง ของแข็งละลายน้ำ อุณหภูมิ พีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกรันหินปูนตามดัชนีแลงเกลียร์ในการสังเคราะห์น้ำตัวอย่างและให้ความร้อนแก่ระบบที่อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส โดยจากการทดลองเครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้า

พบว่าไม่สามารถยับยั้งการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตได้ แต่ผลของการเปลี่ยนแปลงของผลึกตะกอนหลังจากผ่านเครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้า ซึ่งแสดงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกและมีแนวโน้มในการเกิดโครงสร้างผลึกแบบอะราโกไนต์มากกว่า

Kotbia และ Samira (2012) ศึกษาการขจัดคราบหินปูนจากท่อน้ำใต้ดินของเมือง Ain M'lila ซึ่งตั้งอยู่ทางตะวันออกเฉียงของประเทศแอลจีเรีย ซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในการอุปโภคและบริโภค โดยพบว่า น้ำมีความกระด้างและมีอุณหภูมิ 87 °F ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดตะกอนในรูปของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สะสมในเส้นท่อส่งน้ำ ในการศึกษาจะใช้วิธีการเติม Ca(OH)_2 , Na_2CO_3 และ KH_2PO_3 ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน และศึกษาที่อุณหภูมิ 30 °C แต่ที่อุณหภูมิ 20 °C ทำการบำบัดด้วยการใช้หลักเคมีไฟฟ้า (Chronoamperometric Method) พบว่า สามารถช่วยแก้ไข้ปัญหาในการเกิดตะกอน (scaling) ในเส้นท่อได้

Y. Zarga, H. Ben Boubaker, N. Ghaffour และ H. Elfil (2013) ศึกษาการตกตะกอนร่วมกัน (Co-precipitation) ของ CaCO_3 และ CaSO_4 สภาวะที่ศึกษาประกอบด้วยพีเอช สภาพเบส ปริมาณไอออนแคลเซียม และใช้แท่งอิเล็กโทรดควอตซ์ ติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณตะกอนทั้งสองชนิดซึ่งสามารถวัดได้ต่ำถึง 10^{-9} g (Quartz crystal microbalance ; QCM) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใดก็ตามที่เกิดผลึกยิปซัม (CaSO_4) ก่อนจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดตะกอน CaCO_3 และเมื่อนำผลึกไปศึกษาด้วย (Scanning Electronic Microscopy, SEM) และ IR Spectroscopy พบว่า อยู่ในรูปยิปซัมมากกว่า Calcite ขณะที่ผลึก Vaterite พบน้อยมาก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดการดูดแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Analyst 200
- 2) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 10s UV-Vis
- 3) เตาให้ความร้อน (Heating mantle) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Fisher stirring hotplate
- 4) เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (conductivity meter) ภาคสนาม รุ่น HQ40d ยี่ห้อ HACH
- 5) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น Model 250 บริษัท Denver Instrument
- 6) เครื่องวัดความขุ่นเนฟโฟโลมิเตอร์ ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100P
- 7) เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก ยี่ห้อ microscope world รุ่น SH-3
- 8) กระดาษกรอง Whatman GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm
- 9) เครื่องแก้วต่างๆสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ
 - 9.1) ปิเปต
 - 9.2) บิวเรต
 - 9.3) บีกเกอร์
 - 9.4) ขวดรูปخمพู่
 - 9.5) ขวดปรับปริมาตร

3.1.2 สารเคมี

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) เข้มข้น 37% เกรดวิเคราะห์
- 2) สารละลายกรดไนตริก (nitric acid, HNO₃) เข้มข้น 65% เกรดวิเคราะห์
- 3) สารละลายกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H₂SO₄) เข้มข้น 98% เกรดวิเคราะห์
- 4) สารละลายกรดแอสติก 99% (acetic acid, CH₃COOH) เกรดวิเคราะห์
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์
- 6) โซเดียมซัลเฟต (standardsulfate, Na₂SO₄) เกรดวิเคราะห์
- 7) แบเรียมคลอไรด์ (barium chloride, BaCl₂) เกรดวิเคราะห์
- 8) โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na₂CO₃) เกรดวิเคราะห์

- 9) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) เกรดวิเคราะห์
- 10) ไดโซเดียมเอ็ดทีเอ (sodium EDTA, Na_2EDTA) เกรดวิเคราะห์
- 11) แอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride, NH_4Cl) เกรดวิเคราะห์
- 12) สารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักเหล็ก สังกะสีและแคลเซียม สำหรับการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของอะตอม
- 13) แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์
- 14) แอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต (antimony potassium tartrate, $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์
- 15) กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) เกรดวิเคราะห์
- 16) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium hydrogen phosphate, KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์
- 17) แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride, $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- 18) โซเดียมแอซิเทต (sodium acetate, $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- 19) โพแทสเซียมไนเทรต (potassium nitrate, KNO_3)
- 20) โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 21) น้ำกลั่น (deionized water)
- 22) ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein indicator, $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$)
- 23) เมทิลออเรนจ์ (methyl orange, $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$)

3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำตัวอย่าง

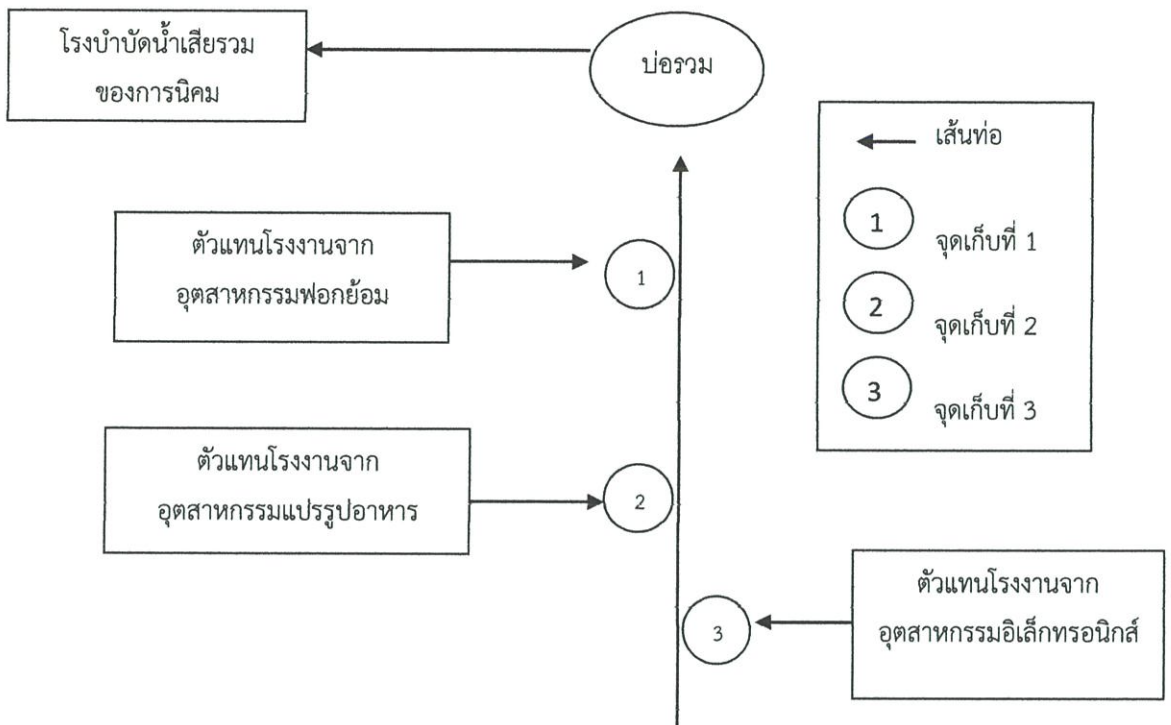
3.2.1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

เก็บตัวอย่างแต่ละจุดโดยใช้การเก็บแบบจ้วง บริเวณปลายท่อของอุตสาหกรรมสามกลุ่ม (ดังรูปที่ 3.1) คือ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ พอกย้อมและแปรรูปอาหาร โดยจะเลือกเก็บน้ำเสีย อุตสาหกรรมละ 1 โรงงาน เพื่อเป็นตัวแทนของอุตสาหกรรมแต่ละกลุ่ม เก็บน้ำประมาณ 1.5 ลิตร แต่ละจุดแบ่งใส่สองขวด ขวดละ 700 มิลลิลิตร

ขวดที่ 1 ปรับพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก เพื่อนำไปวิเคราะห์แคลเซียม เหล็กและ สังกะสี

ขวดที่ 2 นำไปวิเคราะห์หาฟอสเฟต, ซัลเฟต, ความกระด้างและสภาพต่างที่ห้องปฏิบัติการ โดยทั้งหมดจะเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 4 วัน

พารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบในภาคสนาม ได้แก่ การวัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมมิเตอร์ การวัดค่าพีเอชใช้เครื่องวัดพีเอช การวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายทั้งหมดใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 แผนผังเส้นท่อน้ำเสียของการนิคมอุตสาหกรรม

3.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ต่างๆที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณซัลเฟต ปริมาณฟอสเฟต โลหะหนัก ความกระด้างและสภาพต่างของน้ำ ซึ่งวิธีในการวิเคราะห์สามารถทำได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1992)

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต	นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)
การวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอบิก	นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)
การวิเคราะห์หาโลหะหนักสังกะสีและแคลเซียม	นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดการดูดแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer)
การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำ	นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีไทเทรตด้วยอีดีทีเอ
การวิเคราะห์สภาพพด่างของน้ำ	นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก

3.3 การสร้างตะกรันจำลองบนท่อเหล็กเพื่อศึกษาการชะล้างตะกรัน

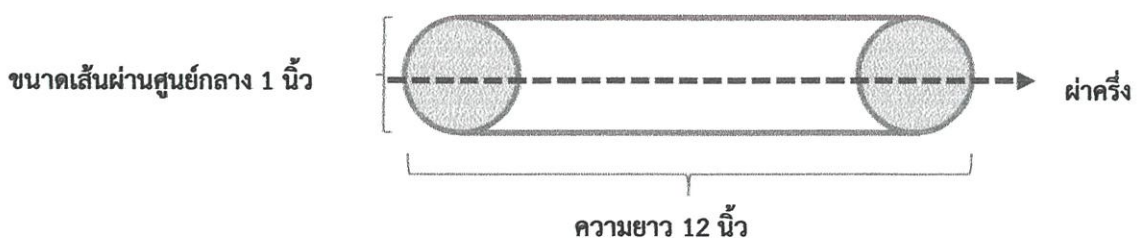
นำท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 12 นิ้ว ผ่ากลาง เพื่อความสะดวกในการสังเกตตะกรัน สร้างตะกรันทั้งหมด 6 ชุด โดยท่อท่อเหล็กด้วยฟรอยด์ จากนั้นใช้สารแคลเซียมคาร์บอเนตละลายด้วยน้ำกลั่น เเทลงบนท่อเหล็ก ให้ความร้อนเพื่อเร่งให้แคลเซียมคาร์บอเนตเกาะผนังท่อเร็วยิ่งขึ้น ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

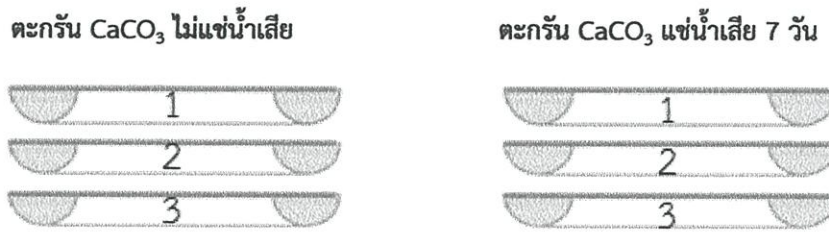
ท่อ 3 ชุด แรกไม่มีการแช่น้ำเสีย ขณะที่ท่ออีก 3 ชุด นำไปแช่น้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีแอมโมเนีย ก่อให้เกิดตะกรันมากที่สุดเป็นเวลาทั้งสิ้น 7 วัน โดยมีการจำลองเหตุการณ์ให้เหมือนกับท่อน้ำเสียที่โรงงานอุตสาหกรรม คือ ในตอนกลางวันจะให้ความร้อน 40 องศาเซลเซียส ส่วนในเวลากลางคืนจะแช่น้ำเสียทิ้งไว้

ท่อหมายเลข 1 ใช้ศึกษารูปแบบตะกรัน (control)

ท่อหมายเลข 2 ฉีดล้างตะกรันออกด้วยน้ำ

ท่อหมายเลข 3 ล้างตะกรันออกโดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น 0.100 โมลาร์





รูปที่ 3.2 การเตรียมท่อเหล็ก

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 ผลจากการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ รุ่น 17 (Minitab 17) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มอุตสาหกรรม

3.4.2 ทำนายแนวโน้มการเกิดตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ดัชนีแลงเกิลีย์และไรนาร์

3.4.3 ทำนายแนวโน้มการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างและสภาพต่าง และพิจารณาการกัดกร่อนในเส้นท่อโดยใช้เส้นโค้งเบย์ลิส

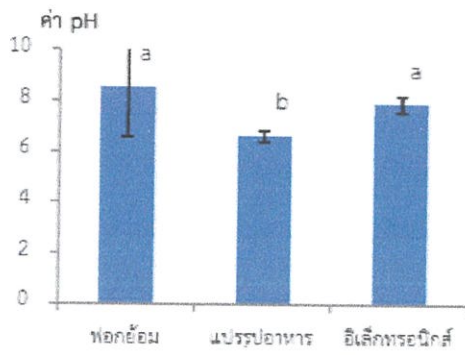
3.4.4 วิเคราะห์ชนิดของตะกอนร่วมในเส้นท่อน้ำเสีย โดยใช้หลักสมมูลเคมีเพื่อหาองค์ประกอบหลักของตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียอุตสาหกรรม

บทที่ 4

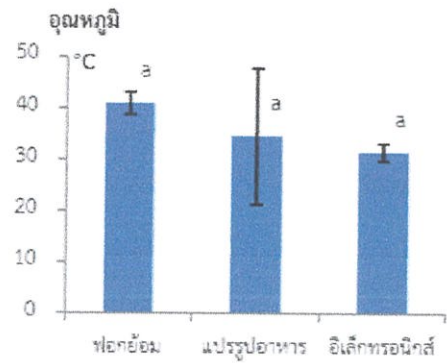
ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรม

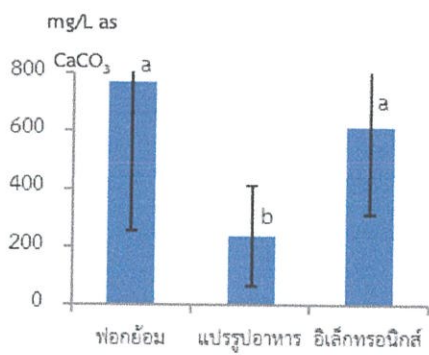
จากการเก็บน้ำเสียจากปลายท่อของอุตสาหกรรม 3 กลุ่ม มาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สภาพต่าง ความกระด้างทั้งหมดและของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.1 - 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชในน้ำเสีย พบว่า มีเพียงอุตสาหกรรมเดียวที่มีสภาพน้ำ เป็นกรด คือ อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร พีเอชเท่ากับ 6.60 ± 0.21^b ส่วนอุตสาหกรรมฟอกย้อมและ อิเล็กทรอนิกส์มีสภาพน้ำเป็นเบส พีเอชเท่ากับ 8.55 ± 1.99^a และ 7.88 ± 0.31^a ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.1) สำหรับรูปที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิในน้ำเสีย พบว่า อุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงสุด ได้แก่ อุตสาหกรรม ฟอกย้อมมีอุณหภูมิ 40.87 ± 2.22^a องศาเซลเซียส โดยอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารและอิเล็กทรอนิกส์ มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ 34.49 ± 13.30^a และ 31.40 ± 1.69^a องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ความ กระด้างทั้งหมดในน้ำเสีย (ดังรูปที่ 4.3) พบว่า อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมีค่าความกระด้างทั้งหมด น้อยที่สุดเท่ากับ 239.51 ± 172.53^b มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่ อุตสาหกรรมที่มีค่าความกระด้างทั้งหมดใกล้เคียงกัน คือ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอกย้อม เท่ากับ 613.40 ± 302.90^a และ 768.50 ± 511.47^a มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียม-คาร์บอเนต ตามลำดับ สำหรับค่าสภาพต่างเมื่อเรียงจากมากไปน้อย พบว่า อุตสาหกรรมฟอกย้อม อิเล็กทรอนิกส์ และแปรรูปอาหารมีสภาพต่างทั้งหมดเท่ากับ 516.99 ± 416.84^a , 244.92 ± 124.07^a และ 98.80 ± 20.19^b มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.4) สำหรับ ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำเสีย (ดังรูปที่ 4.5) พบว่า อุตสาหกรรมที่มีค่าของแข็ง ละลายน้ำทั้งหมดสูงสุด คือ อุตสาหกรรมฟอกย้อม $3,320.94 \pm 1,701.30^a$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมา ด้วยอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และแปรรูปอาหาร $2,597.36 \pm 1,334.81^a$ และ $1,846.34 \pm 1,328.42^a$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสีย พบว่า อุตสาหกรรมที่มีฟอสเฟตสูงสุด คือ อุตสาหกรรมฟอกย้อม 0.42 ± 0.33^a มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อมาเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และแปรรูปอาหาร 0.39 ± 0.33^a และ 0.17 ± 0.19^a มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 และ ในน้ำเสียนี ปริมาณซัลเฟตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอิเล็กทรอนิกส์มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 776.21 ± 854.17^a และ 858.84 ± 384.82^a มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมีค่าเท่ากับ 100.29 ± 58.74^b มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.7



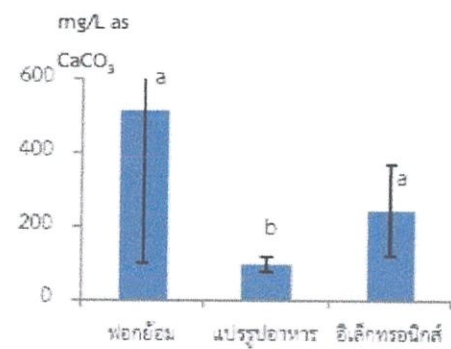
รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชในน้ำเสีย



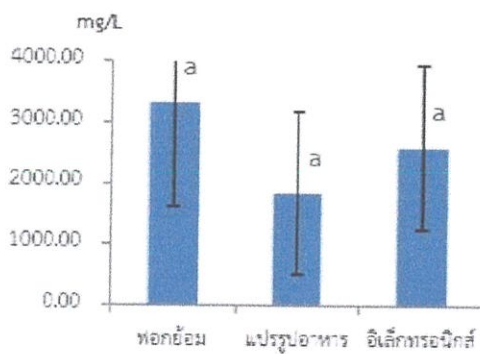
รูปที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิในน้ำเสีย



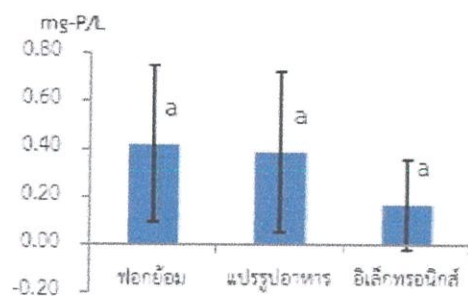
รูปที่ 4.3 ค่าความกระด้างทั้งหมดในน้ำเสีย



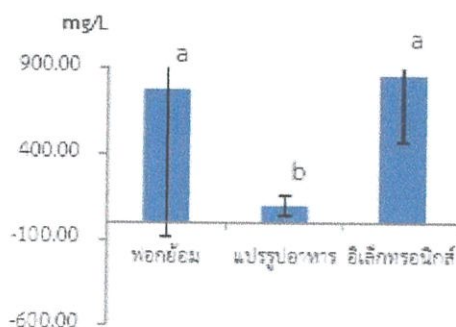
รูปที่ 4.4 ค่าสภาพต่างทั้งหมดในน้ำเสีย



รูปที่ 4.5 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ในน้ำเสีย



รูปที่ 4.6 ค่าฟอสเฟตในน้ำเสีย



รูปที่ 4.7 ค่าแคลเซียมในน้ำเสีย

4.2 แนวโน้มของการเกิดตะกอนในเส้นท่อในรูปตะกอน CaCO_3

จากลักษณะทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมทั้ง 3 กลุ่ม สามารถนำมาคำนวณหาค่าดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ โดยใช้ข้อมูลหุภูมิ พีเอช สภาพต่าง ความกระด้างและของแข็งละลายน้ำทั้งหมด เพื่อทำนายแนวโน้ม การเกิดตะกอนในเส้นท่อน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.1

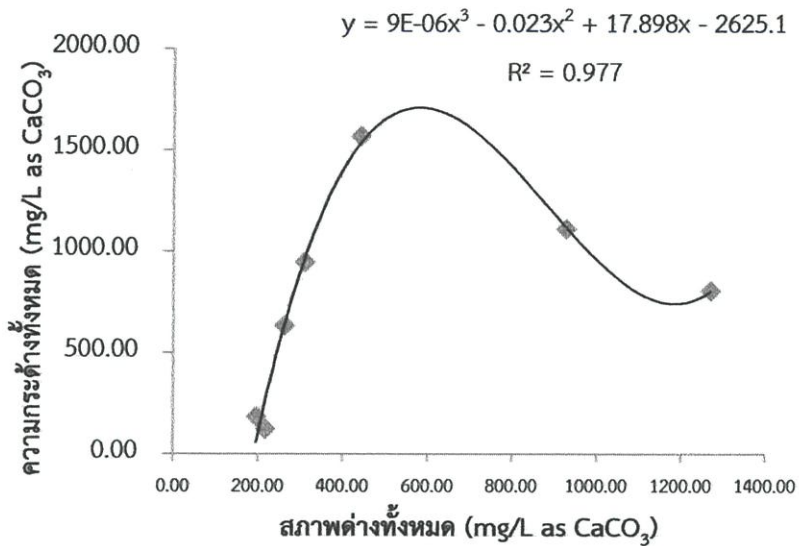
ในการใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ทำนายแนวโน้มการก่อตะกอนในเส้นท่อน้ำเสียเบื้องต้นพบว่า อุตสาหกรรมพอกย้อมมีแนวโน้มในการก่อตะกอนสูงสุด รองลงมาเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และสุดท้ายเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดตะกอน แต่อาจเกิดการกัดกร่อนเส้นท่อน้ำเสียได้ เนื่องจากไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียและสภาพน้ำที่เป็นกรดจะไปเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการกัดกร่อนเส้นท่อที่เป็นเหล็กได้

ตารางที่ 4.1 ผลการทำนายแนวโน้มการก่อตะกอนโดยใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์

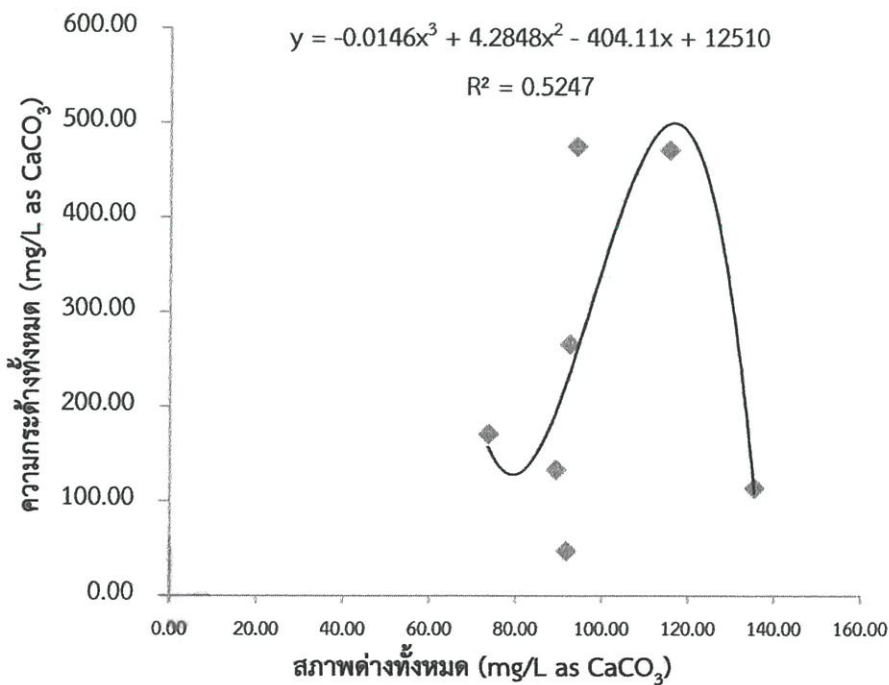
กลุ่มอุตสาหกรรม	ดัชนีแลงเกลียร์	ดัชนีโรนาร์
พอกย้อม	มีการก่อตัวของตะกอนเป็นชั้นหนา	เกิดตะกอนชั้นหนา
แปรรูปอาหาร	เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อย แต่ไม่เกิดตะกอน	เกิดการกัดกร่อน
อิเล็กทรอนิกส์	เกิดตะกอนบางๆ	เกิดตะกอนชั้นบางๆ

เนื่องจากดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ เหมาะสำหรับการทำนายการเกิดตะกอนในเส้นท่อน้ำดี (ระบบน้ำใช้ในหม้อไอน้ำ) จึงนำค่าสภาพต่างทั้งหมดและความกระด้างของน้ำมาสร้างกราฟ พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบโพลีโนเมียล (polynomials) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ดังรูปที่ 4.8 – 4.10) อุตสาหกรรมพอกย้อมมีแนวโน้มในการก่อตะกอนตามเส้นท่อน้ำเสียมากที่สุด ตามด้วยอุตสาหกรรม

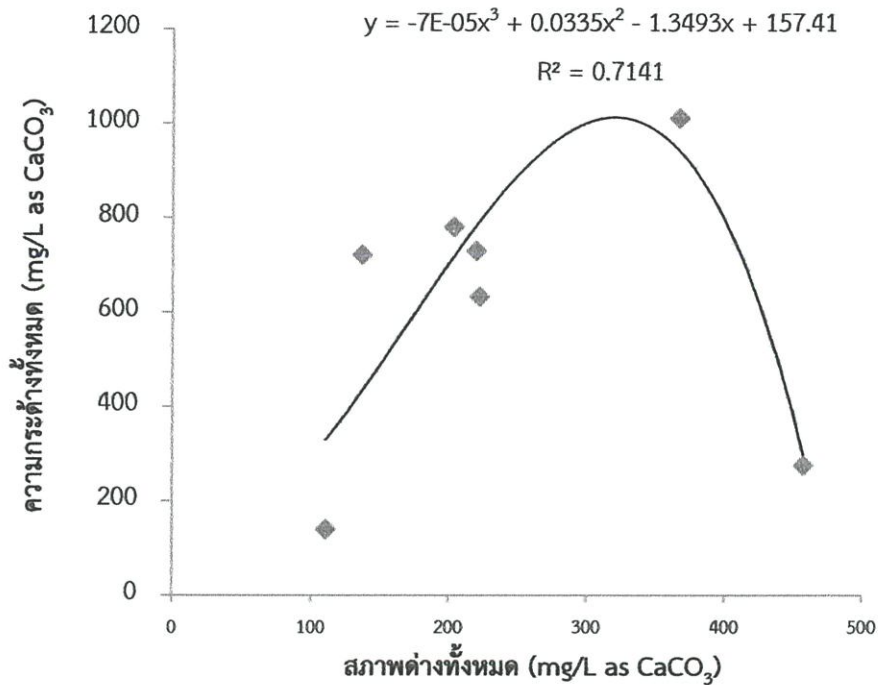
อิเล็กทรอนิกส์และแปรรูปอาหาร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่าความกระด้างเนื่องจากคาร์บอเนตพบมากที่สุดในอุตสาหกรรมฟอกย้อม รองลงมาเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และแปรรูปอาหาร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทำนายโดยใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพด่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

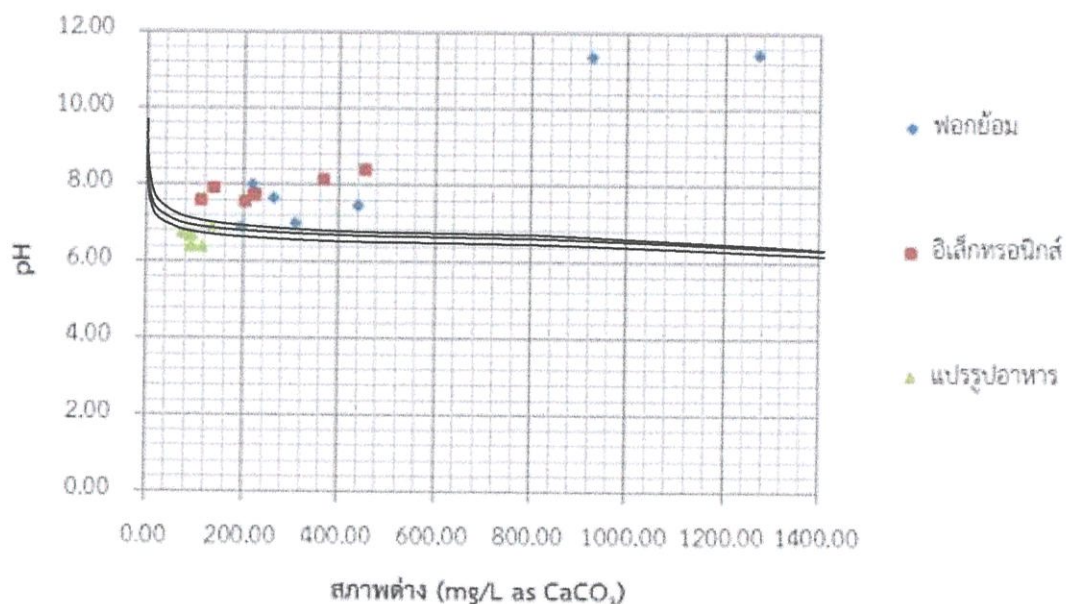


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพด่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างทั้งหมดและสภาพด่างทั้งหมดของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อนำค่าสภาพด่างและค่าพีเอชมาพล็อตลงในแกน x และ แกน y ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.11) ใช้กราฟของเบย์ลิส พิจารณาเส้นโค้งที่เกิดขึ้น พบว่า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอิเล็กทรอนิกส์ มีแนวโน้มในการก่อตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและสภาพด่างของน้ำเสียทั้ง 2 อุตสาหกรรมอยู่เหนือเส้นบนสุดของเบย์ลิส ซึ่งเป็นเส้นที่เริ่มเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและเกิดการอิมิตัวเป็นตะกอน ส่วนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมีความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและสภาพด่างอยู่ต่ำกว่าเส้นล่างของเบย์ลิส ซึ่งเป็นเส้นของการรักษาระดับ เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนในท่อเหล็ก ทั้งนี้ความสัมพันธ์ที่ต่ำกว่าเบย์ลิสแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสามารถกัดกร่อนท่อเหล็กได้ เนื่องจากมีโปรตอนและสภาพด่างที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้น้ำเสียมีคุณสมบัติในการกัดกร่อน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและสภาพต่างของน้ำเสีย

4.3 แนวโน้มของตะกอนในรูปตกตะกอนร่วมชนิดอื่นๆ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไอออนบวกและไอออนลบในน้ำเสียอุตสาหกรรมแต่ละกลุ่ม โดยคำนวณในหน่วยน้ำหนักสมมูล (meq/L or mN) ผลแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า โดยทั่วไปที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก คือ ละลายได้ 6.17×10^{-3} กรัมต่อลิตร แคลเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้ 2.55 กรัมต่อลิตร แคลเซียมฟอสเฟตละลายน้ำได้ 0.02 กรัมต่อลิตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้ 1.73 กรัมต่อลิตร เพอร์สซัลเฟตละลายได้ 28.8 กรัมต่อลิตร เพอร์สคาร์บอเนตละลายได้ 6.54×10^{-5} กรัมต่อลิตร ซิงค์คาร์บอเนตละลายได้ 4.69×10^{-5} กรัมต่อลิตร ซิงค์ซัลเฟตละลายได้ 53.8 กรัมต่อลิตร (Solubility Database - IUPAC/ National Institute of Standards and Technology) ดังนั้น การตกตะกอนจะเกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนแคลเซียมซัลเฟต เนื่องจากสภาพการละลายที่แตกต่างกันมาก

นอกจากนี้ยังพบว่า ไอออนบวกที่พบมากที่สุดคือ แคลเซียม ส่วนไอออนเหล็กและสังกะสี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีปริมาณน้อยกว่าแคลเซียม ดังนั้น ผลกระทบจากตะกอนโลหะหนักจึงน้อยกว่าตะกอนที่เกิดจากแคลเซียม ทั้งนี้ จากตารางที่ 4.2 สามารถทำนายชนิดของตะกอนที่อยู่ในเส้นท่อน้ำเสียได้ โดยในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะพบตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไอออนแคลเซียมเมื่อจับกับไอออนคาร์บอเนตและไอออนไบคาร์บอเนตจนหมดไม่เหลือไอออนแคลเซียมที่จะมาทำปฏิกิริยากับไอออนซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเสีย ขณะที่ปริมาณไอออนแคลเซียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมอีเล็กทรอนิกส์ มีปริมาณสูง หลังจากเกิดปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและ

แคลเซียมไบคาร์บอเนตแล้ว ยังคงมีไอออนแคลเซียมเหลือเท่ากับ 8.858 มิลลิกรัมสำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมอิเล็กโทรนิคส์มีปริมาณสูงโอกาสที่จะเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจึงมีความเป็นไปได้สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารพบปริมาณแคลเซียมน้อยที่สุด ดังนั้น ความสามารถในการก่อตะกอนแคลเซียมจึงน้อยกว่าในสองอุตสาหกรรมแรกที่กำลังมาข้างหน้า

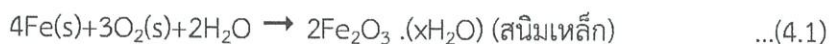
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณที่ก่อตะกอนในเส้นท่อน้ำเสีย (โดยคำนวณในหน่วยน้ำหนักสมมูล (meq/L))

ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	อุตสาหกรรม		
		ฟอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กโทรนิคส์
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	mN	1.33E-02 ^a	1.23E-02 ^a	5.31E-03 ^a
ซัลเฟต (SO_4^{2-})	mN	16.171 ^a	2.089 ^b	17.893 ^a
ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)	mN	3.331 ^a	1.620 ^a	3.700 ^a
คาร์บอเนต (CO_3^{2-})	mN	6.901 ^a	0.000 ^a	1.150 ^a
ไฮดรอกไซด์ (OH^-)	mN	6.278 ^a	0.000 ^a	0.000 ^a
แคลเซียม (Ca^{2+})	mN	9.126 ^a	2.049 ^b	11.408 ^a
เหล็ก (Fe^{2+})	mN	0.048 ^a	0.077 ^a	0.065 ^a
สังกะสี (Zn^{2+})	mN	0.006 ^a	0.008 ^a	0.009 ^a

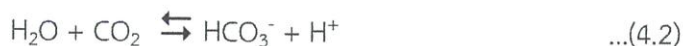
4.4 การละลายตะกอนหรือตะกอน CaCO_3 ออกจากท่อเหล็ก

ในการศึกษาการล้างตะกอนออกจากท่อเหล็ก ได้ทำการสร้างตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เกิดในท่อเหล็ก ตะกอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะสีขาวเนื้อละเอียด (ดังรูปที่ 4.12) ขณะที่ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นบนท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียทุกๆวันต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน พบว่า สีของตะกอนที่เกาะบนท่อจะมีสีเข้มขึ้นและยึดเกาะแน่นกว่าเดิม (ดังรูปที่ 4.13) และเมื่อใช้น้ำประปาฉีดล้างตะกอนแคลเซียมจะหลุดออกทันที (ดังรูปที่ 4.14) ต่างจากตะกอนที่เกิดบนท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียจะล้างออกไม่หมด (ดังรูป 4.15) โดยมีตะกอนบางส่วนติดแน่นกับท่อเหล็กและเมื่อนำมาล้างด้วยกรดไนตริก เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าเกิดฟองแก๊ส ตะกอนบางส่วนหลุดออกและบางส่วนละลาย (ดังรูป 4.16) ที่ผิวของท่อเหล็กพบสนิมใต้ผิวตะกอนที่เกาะอยู่บนท่อซึ่งการเกิดสนิมเหล็ก มีผลทำให้ผิวของท่อมีความเป็นรูพรุน พื้นที่ผิวด้านในเป็นร่องโอกาสที่ตะกอนจับยึดแน่นมีมากขึ้น รวมทั้งในน้ำเสียมีสารอินทรีย์อยู่ด้วยจึงมีโอกาสที่จะเกิดแก๊ส CO_2 ทำให้อาจเกิดการกัดกร่อนผิวโลหะร่วมด้วย โปรตอนที่เกิดจาก CO_2 ทำให้เกิดอิเล็กตรอนจากเหล็กทำให้เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิม ดังสมการ 4.1-4.4 นอกจากนี้ในน้ำเสียยังมีไอออนลบอื่นๆ เช่น ซัลเฟต อาจเกิดตะกอนอื่นๆร่วมด้วยจึงทำให้ล้างออกได้ยากขึ้น

ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก ดังสมการที่ 4.1



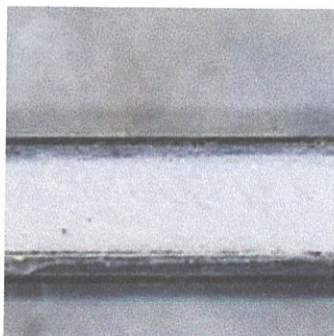
กรณีที่น้ำเสียมี CO_2 จะเกิดโปรตอนขึ้น ดังสมการที่ 4.2



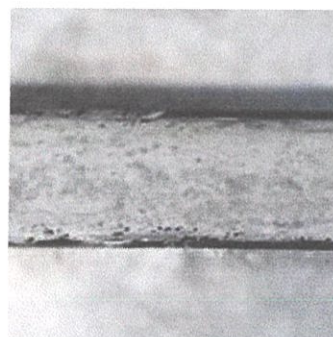
โปรตอนที่เกิดจาก CO_2 จะไปดึง e^- จากเหล็กทำให้เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเร็วขึ้น ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4



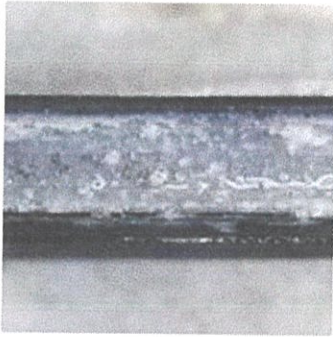
จากการทดลองของ พัชรินทร์และคณะ (2557) สามารถสลายตะกรันได้ โดยใช้กรดเข้มข้น เนื่องจากในท่อน้ำเสียนอกจากจะมีตะกอนเคมีแล้ว ยังมีตะกอนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์มีผลทำให้เกิดการจับตัวร่วมกันแน่นยิ่งขึ้น แต่ในการทดลองสร้างตะกรันขึ้นเองนั้น เป็นตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว การล้างท่อจึงสามารถล้างได้โดยใช้น้ำฉีดล้างหรือใช้กรดอ่อนๆ



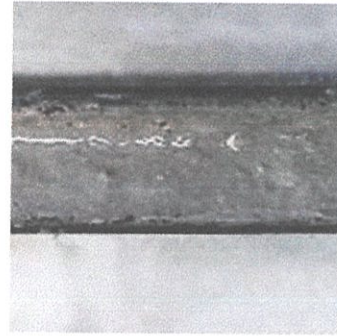
รูปที่ 4.12 ลักษณะตะกอน CaCO_3 บนท่อเหล็กที่ไม่แช่น้ำเสีย



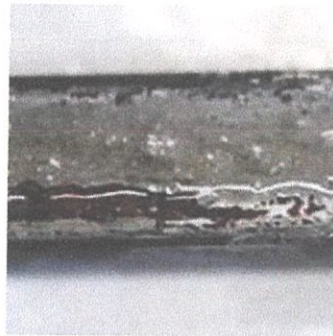
รูปที่ 4.13 ลักษณะตะกอน CaCO_3 บนท่อเหล็กที่แช่น้ำเสียเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.14 ลักษณะตะกอน CaCO_3 บน
ท่อเหล็กหลังฉีดล้างด้วยน้ำ



รูปที่ 4.15 ลักษณะตะกอน CaCO_3 บนท่อเหล็ก
ที่แช่น้ำเสียหลังฉีดล้างด้วยน้ำ



รูปที่ 4.16 ลักษณะตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ติดกับท่อเหล็ก ที่แช่น้ำเสียเป็นเวลา 7 วัน ฉีด
ล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

โครงการพิเศษฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาและตรวจวัดปริมาณสารที่ก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร โดยสรุปผลได้ ดังนี้

1) ผลจากการศึกษาพารามิเตอร์ในน้ำตัวอย่างเบื้องต้น เพื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถในการก่อตะกรันโดยใช้ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ พบว่า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีศักยภาพในการก่อตะกรันมากที่สุด รองลงมาเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และแปรรูปอาหาร ตามลำดับ

2) ผลจากการศึกษาการก่อตะกรันในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างและความกระด้าง เพื่ออธิบายแนวโน้มการก่อตะกรันในเส้นท่อน้ำเสียอุตสาหกรรมสรุปได้ว่าการใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด จึงมีแนวโน้มในการก่อให้เกิดปัญหาตะกรันได้สูงกว่าอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และแปรรูปอาหาร ตามลำดับ สำหรับกราฟเบย์ลิส พบว่าอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอิเล็กทรอนิกส์ มีแนวโน้มในการก่อตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต ขณะที่น้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีคุณสมบัติกัดกร่อนเส้นท่อน้ำเสีย

3) ผลจากการศึกษาองค์ประกอบร่วมของตะกรันของน้ำเสียในเส้นท่อน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสรุปได้ว่า ไอออนบวกที่พบมากที่สุดคือ แคลเซียม ส่วนไอออนลบที่พบมากที่สุด คือคาร์บอเนตและซัลเฟต นอกจากนี้ยังตรวจพบสภาพต่างแบบไบคาร์บอเนต ดังนั้น อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีแนวโน้มในการก่อให้เกิดปัญหาตะกรันที่มาจากแคลเซียมคาร์บอเนตมากที่สุด ในขณะที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มในการก่อให้เกิดปัญหาตะกรันจากแคลเซียมซัลเฟตมากที่สุด ส่วนอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารมีปริมาณไอออนบวกที่มีแนวโน้มในการก่อให้เกิดปัญหาตะกรันน้อยมาก

4) ผลจากการศึกษาโลหะหนักที่มีแนวโน้มในการก่อตะกรัน สรุปได้ว่า โลหะหนักมีปริมาณน้อยมาก ปัญหาตะกรันที่เกิดจากโลหะหนักจึงไม่ค่อยเกิด รวมทั้งปริมาณโลหะหนักในอุตสาหกรรมทั้งสามกลุ่ม ไม่แตกต่างกัน

5) ผลจากการศึกษาการสร้างตะกรันในเส้นท่อจากแคลเซียมคาร์บอเนตสรุปได้ว่า ตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนตที่สร้างขึ้น ไม่มีคุณสมบัติเกาะกับพื้นผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเมื่อนำท่อเหล็กมาแช่น้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่า ผิวงู้น้ำท่ออาจถูกกัดกร่อนด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ตะกรัน

แคลเซียมคาร์บอเนตและสนิมเหล็กเกาะติดกับผิวท่อ รวมทั้งการเกิดตะกอนเคมีในรูปแคลเซียมซัลเฟต เพอร์สคาร์บอเนต และตะกอนอินทรีย์อื่นๆ ร่วมด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเก็บน้ำเสียอุตสาหกรรมควรเก็บแบบผสม (composite) เพื่อให้เป็นตัวแทนของน้ำเสีย เนื่องจากในแต่ละช่วงเวลาจะมีการผลิตที่แตกต่างกัน รวมทั้งควรเก็บน้ำหลายโรงงานเพื่อเป็นตัวแทนของกลุ่มอุตสาหกรรม
2. ควรศึกษาตะกอนในเส้นท่อเหล็กควรทำการแช่น้ำเสียให้ยาวนานขึ้นและศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่เกิดขึ้นร่วมกับชนิดของตะกอนในน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : หน้า 18.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวทางปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรม อาหารทะเลแช่เยือกแข็งประเภทปลา. เล่มที่7/8. กรุงเทพฯ : กรมควบคุมมลพิษ
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2551. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (IC และ PCB). [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2558).
Available : http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry25.asp
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556. แนวทางการจัดการน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. คู่มือการเก็บตัวอย่างมลพิษ (น้ำ อากาศ ดิน ภาคอุตสาหกรรม). บริษัท ยูโนเด็ค แอนนาลิสต์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงานพ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549
- การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. 2555. นิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาคร. [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2558). Available : <http://www.ieat.go.th>
- การประปานครหลวง. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2558)
Available : http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf
- ชนิษฐา. 2550. อุตสาหกรรมฟอกย้อม. [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 16 พฤศจิกายน 2558)
Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php
- ณรงค์ วุฑฒเสถียร. 2548. การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท
- ณัฐ คุ้มภู. 2553. ความหมายตะกอน วิกฤตโรค วิกฤตโลก. [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2558) Available : <http://www.thaihealth.or.th/Content/21541-html>

- นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์และคณินดา ตังคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ประจวบ แก้วเสถียร. 2554. ศึกษาการบำบัดน้ำบาดาลที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง. หน้า131-134. ศูนย์ฝึกอบรมวิศวกรรมศาสตร์ กองวิทยาลัยเกษตรกรรม, กรมอาชีวศึกษา
ปราโมช เชี่ยวชาญ. (2552). น้ำดื่มในสถานประกอบการ/โรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 3 – คุณภาพ
น้ำทางกายภาพและเคมี. จุลสารสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ ฉบับที่ 3 ปี 2552
- ปริญญา ประโลมรัมย์. 2553. การแก้ปัญหาการเกิดตะกอนในเส้นท่อของโรงงานแปรรูปอาหาร
ทะเลแช่แข็ง. [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2558)
Available :http://dric.nrct.go.th/bookdetail.php?book_id=240767
- พัชรินทร์ วาทีบุญเลิศ, ศศิธร สุทธิกรม และสกุรัตน์ บุญชู. 2557. การตรวจวิเคราะห์สารปนเปื้อน
ในเส้นท่อน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พิพัฒน์ บริบาลนุกุล. 2556. ผลของการใช้เครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้าต่อการเกิดตะกอนแคลเซียม
คาร์บอเนต. โครงการพิเศษ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.) บัณฑิตวิทยาลัย,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2557. อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม. [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 16
พฤศจิกายน 2558). Available :
http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/category/083/นวัตกรรมอาหารพระจอมเกล้าลาดกระบัง
- มันสิน ตันจุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภา และมันรัช ตันจุลเวศม์. 2545. การปรุงแต่ง
คุณภาพน้ำดื่ม 1 : สำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัท สันติศิริ จำกัด
- มันสิน ตันจุลเวศม์ และ มันรัช ตันจุลเวศม์. 2548. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 86.
- วรรณศรี บุญยรัตพันธุ์. 2536. เทคนิคการกำจัดน้ำสกปรกจากอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2.
ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 78.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2557. ตะกอนและดัชนีทำนายนการเกิด
ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต. [Online] (เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2558)
Available :<http://www.tistr.or.th/ed/?p=555>
- สภาวิศวกร. ม.ป.ป. มาตรฐานวิชาชีพเรื่องหม้อไอน้ำ. [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 16 พฤศจิกายน 2558)
Available : http://www.coe.or.th/_coe/_product/20121204155051-1.pdf

- มหาวิทยาลัยเอ็กซ์เตอร์สพระราชอาณาจักร. 2550. **บทคัดย่อจากรายงาน'มลพิษจากอุตสาหกรรมไฮเทค'การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์.** (รายงานทางเทคนิคเลขที่ 01/2007)
- American Public Health Association. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2558)
Available : <https://www.standardmethods.org/>
- Brigden, K., Labunska, I., Santillo, D. and Allsopp, M. 2005. **Recycling of electronic wastes in China and India: workplace and environmental contamination.** Greenpeace Research Laboratories Technical.
- Brigden, K. and D. Santillo. 2006. **Determining the presence of hazardous substances in five brands of laptop computers.** Greenpeace Research Laboratories Technical.
- I. Zaslavski, H. Shemer, D. Hasson and R. Semiat. 2013. **Electrochemical CaCO₃ scale removal with a bipolar membrane system.** Department of Chemical Engineering, Technion - Israel Institute of Technology.
- IUPAC-NIST SOLUBILITY DATA SERIES. 2007. **Solubility Database - IUPAC/ National Institute of Standards and Technology.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2558) Available : <http://srdata.nist.gov/solubility/IUPAC/iupac.aspx>
- K. Labioda and S. Ghizellaoui. 2012. Study of the Scaling : Chemical, Electrochemical Processes in the Presence of Ca(OH)₂, Na₂CO₃ and KH₂PO₄. **Energy Procedia.**
- L. Kong, J. Bai, Z. Bai, Z. Guo and W. Li. 2013. **Effects of CaCO₃ on slag flow properties at high temperatures.** Chinese Academy of Sciences.
- MacAdam, J., Parsons, S.A. (2004). Calcium carbonate scale formation and control. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, vol. 3, no. 2, p. 159-169, DOI:10.1007/s11157-004-3849-1.
- Ragsdale & Associates. 2011. **The greatest threat to our planet is the belief that someone else will save it.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2558)
Available : <http://www.ragsdaleandassociates.com/>
- World Bank. 1984. **Environmental Guidelines**, Washington D.C. .
- Y.Zarga, H.BenBoubaker, N.Ghaffour, H.Elfil. 2013. **Chemical Engineering Science.** 96 : 33-41

ภาคผนวก ก

วิธีการทดลอง

ก-1 การวิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อนที่ก่อตะกอนในเส้นท่อน้ำเสีย

ก-1.1 การวิเคราะห์ซัลเฟต

1) สร้างกราฟมาตรฐานความขุ่น

1.1) เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลเฟตให้มีความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซัลเฟตเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรมา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 มิลลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิตร

1.2) ใส่ขวดรูปชมพู่ นำไปทำให้เกิดสารแขวนลอยด้วยแบเรียมคลอไรด์ วัดค่าความขุ่น ทุกๆ 30 วินาที จนถึง 4 นาที

1.3) ทำแบลงค์ โดยไม่เติมสารละลายมาตรฐานซัลเฟต แต่เติมสารเคมีอื่นๆ เหมือนกัน

2) การเตรียมและวัดความขุ่นของน้ำตัวอย่าง

2.1) กรองน้ำตัวอย่าง ด้วยกระดาษกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน ด้วยการกรองแบบลดความดัน

2.2) นำน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นครบ 100 มิลลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร ปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ผสมลงไป 20 มิลลิตร ใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก เพื่อทำการผสมด้วยอัตราเร็วเท่ากันทุกขวด

2.3) เติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ลงไป 1 ช้อนเล็ก กวนจนครบ 1 นาที

2.4) นำน้ำตัวอย่างไปวัดค่าความขุ่น ทุกๆ 30 วินาที จนครบ 4 นาที บันทึกค่าความขุ่น

2.5) ทำแบลงค์ โดยนำน้ำตัวอย่างตามข้อ 2.2 แต่ไม่เติมแบเรียมคลอไรด์ และนำไปวัดค่าความขุ่น ค่าความขุ่นที่วัดได้ จะไปหักลบจากค่าในข้อ 2.4

2.6) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

3) การควบคุมคุณภาพ

3.1) ICVS (Initial Calibration Verification Sample) วัดค่าความขุ่นของสารมาตรฐานซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากได้กราฟมาตรฐาน ค่าต้องแตกต่างไม่เกิน 10%

3.2) CCVS (Continuing Calibration Verification Sample) วัดวัดค่าความขุ่นของสารมาตรฐานซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังวัดน้ำตัวอย่าง ค่าต้องแตกต่างไม่เกิน 15%

ก-1.2 การวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟต

1) การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอสเฟต เตรียมให้อยู่ในช่วง 0.15 -1.30 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร

1.1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตมา 0, 2, 6, 10, 16 และ 24 มิลลิลิตร ใส่ขวด วัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับด้วยน้ำกลั่น จนครบ 50 มิลลิลิตรจะได้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 15, 25, 40 และ 60 ไมโครกรัมฟอสฟอรัส

1.2) เติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร เขย่าตั้งทิ้งไว้ 10 นาที นำไปวัด ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

2) การเตรียมและวัดน้ำตัวอย่าง

2.1) กรองน้ำตัวอย่าง ปิเปตน้ำตัวอย่างที่กรองแล้วมา 10 มิลลิลิตร เติมฟีนอลทาลีน 1 หยด ถ้าได้สีแดง ให้เติมกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มัล ทีละหยดจนสีแดงหายไปปรับเป็น 50 มิลลิลิตร

2.2) เติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร เขย่าตั้งทิ้งไว้ 10 นาที นำไปวัด ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

2.3) ทำแบลนด์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างโดยไม่ได้เติมน้ำยารวม

2.4) วัดตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ

ก-1.3 การวิเคราะห์สภาพต่างทั้งหมด

1) การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล

1.1) ปิเปตสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.02 นอร์มัล มาจำนวน 20 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป 80 มิลลิลิตร

1.2) หยดเมทิลออเรนจ์ 2-3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.02 นอร์มัล จุดยุติของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม

1.3) ทำซ้ำ 3 ครั้ง

2) วิเคราะห์สภาพต่างของน้ำตัวอย่าง

2.1) ปิเปตน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ปรับจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูป-ชมพู่และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่อีกใบเพื่อทำแบลนด์

2.2) หยดโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 หยด เพื่อไล่คลอรีนอิสระที่อยู่ในน้ำ

2.3) หยดฟีนอลฟธาไลน์ 3 หยด ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล จนกระทั่งสีชมพูหายไป (ค่าที่อ่านได้ = P)

2.4) หยดเมทิลออเรนจ์ 3 หยด ลงไปในแต่ละขวด ถ้าตัวอย่างมีสีเหลืองเรื่อๆ ไทเทรตต่อไปด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล กระทั่งสังเกตเห็นเป็นสีส้ม โดยเปรียบเทียบจากแบลนด์ แสดง

ว่า ถึงจุดยุติแล้ว จดปริมาตรกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ทั้งหมดที่ใช้ (รวมปริมาตรกรดที่ใช้ตั้งแต่เริ่มไทเทรต ซึ่งใช้ฟีนอล์ฟธาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์) (ค่าที่อ่านได้ = T)

2.5) ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งสำหรับน้ำตัวอย่าง แบลงค์ทำครั้งเดียวจะได้ค่า P และ ค่า T ทั้งหมดอย่างละ 3 ค่า นำมาเฉลี่ยกัน

ก-1.4 การวิเคราะห์ความกระด้างทั้งหมด

1) หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายอีดีทีเอ 0.01 โมลาร์

1.1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต มา 25 มิลลิลิตร

1.2) เติมบัฟเฟอร์ พีเอช 10 ลงไป 5 มิลลิลิตร เติมเอริโอโครมแบลคทีอินดิเคเตอร์ลงไป 0.5 กรัม

1.3) นำไปไทเทรตกับสารละลายอีดีทีเอ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีอู่นแดงเป็นสีน้ำเงินที่ไม่มีสีแดงปน

1.4) ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ

1.5) ทำแบลงค์โดยใช้ น้ำกลั่น เติมสารตามข้อ 1.2 นำไปไทเทรตกับสารละลายอีดีทีเอ

2) หาความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่าง

2.1) ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 25 มิลลิลิตร

2.2) เติมบัฟเฟอร์ พีเอช 10 ลงไป 5 มิลลิลิตร เติมเอริโอโครมแบลคทีอินดิเคเตอร์ลงไป 1 กรัม

2.3) สารกำจัดตัวรบกวนเติมลงไป 1 มิลลิลิตร

2.4) รินนำไปไทเทรตกับสารละลายอีดีทีเอ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีอู่นแดงเป็นสีน้ำเงินที่ไม่มีสีแดงปน

2.5) ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ

ก-1.5 การวิเคราะห์โลหะ Ca Fe และ Zn

1) การวิเคราะห์แคลเซียม

1.1) การสร้างกราฟมาตรฐานแคลเซียม

1.1.1) เตรียมความเข้มข้นของสารมาตรฐานแคลเซียมเข้มข้น 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 ppm ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายแคลเซียมที่มีความเข้มข้น 10 ppm โดยปิเปตมา 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ

1.1.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม

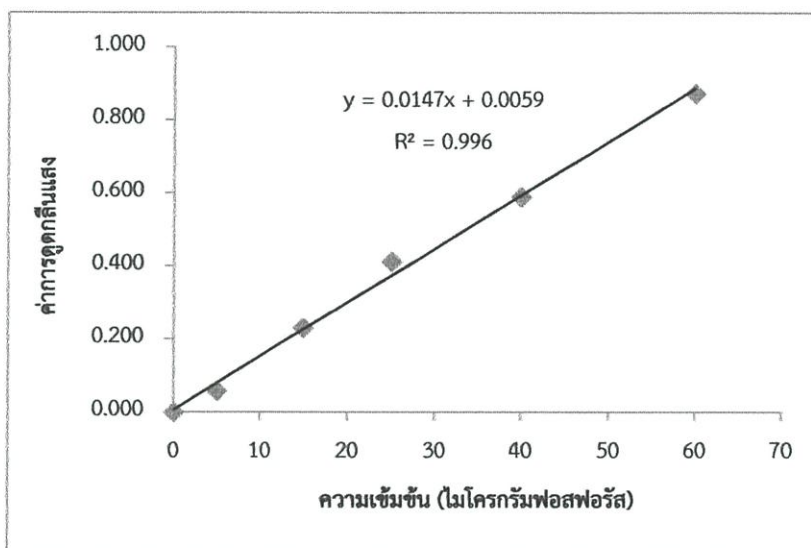
- 1.1.3) ทำแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่น
- 1.2) การวัดปริมาณแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง
- 1.2.1) กรองน้ำตัวอย่างและปิเปตน้ำตัวอย่างที่กรองแล้ว 1 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมในน้ำ) ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
- 1.2.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม
- 2) การวิเคราะห์เหล็ก
- 2.1) การสร้างกราฟมาตรฐานเหล็ก
- 2.1.1) เตรียมความเข้มข้นของสารมาตรฐานเหล็ก 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 และ 3.0 ppm ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้น 10 ppm โดยปิเปตมา 1, 5, 10, 20, 25 และ 30 มิลลิลิตร ตามลำดับ
- 2.1.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม
- 2.1.3) ทำแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่น
- 2.2) การวัดปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง
- 2.2.1) กรองน้ำตัวอย่าง และปิเปตน้ำตัวอย่างที่ กรองแล้ว 10 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กในน้ำ) ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
- 2.2.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม
- 3) การวิเคราะห์สังกะสี
- 3.1) การสร้างกราฟมาตรฐานสังกะสี
- 3.1.1) เตรียมความเข้มข้นของสารมาตรฐานสังกะสี 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 และ 0.6 ppm ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายสังกะสีที่มีความเข้มข้น 1 ppm โดยปิเปตมา 1, 5, 10, 20, 40 และ 60 มิลลิลิตร ตามลำดับ
- 3.1.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม
- 3.1.3) ทำแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่น
- 3.2) การวัดปริมาณสังกะสีในน้ำตัวอย่าง
- 3.2.1) กรองน้ำตัวอย่าง และปิเปตน้ำตัวอย่างที่ กรองแล้ว 1 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในน้ำ) ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

3.2.2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร ใน
เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 ผลการวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟต



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของออร์โธฟอสเฟต

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานฟอสเฟต

ความเข้มข้น (ไมโครกรัมฟอสฟอรัส)	ค่าการดูดกลืนแสง						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013
5	0.058	0.063	0.066	0.068	0.050	0.044	0.068
15	0.231	0.174	0.179	0.189	0.153	0.161	0.167
25	0.412	0.296	0.298	0.314	0.335	0.286	0.284
40	0.590	0.459	0.498	0.507	0.445	0.442	0.446
60	0.873	0.720	0.691	0.725	0.792	0.671	0.681

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสีย

ตัวอย่าง ที่	กลุ่มอุตสาหกรรม	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ปริมาณฟอสเฟต (มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร)
1	อิเล็กทรอนิกส์	0.079	0.083	0.072	0.57
	ฟอกย้อม	0.097	0.101	0.104	0.73
	แปรรูปอาหาร	0.044	0.051	0.048	0.37
2	อิเล็กทรอนิกส์	0.008	0.016	0.007	0.04
	ฟอกย้อม	0.124	0.140	0.108	0.43
	แปรรูปอาหาร	0.022	0.032	0.027	0.10
3	อิเล็กทรอนิกส์	0.016	0.015	0.016	0.19
	ฟอกย้อม	0.063	0.058	0.061	0.58
	แปรรูปอาหาร	0.020	0.015	0.019	0.21
4	อิเล็กทรอนิกส์	0.012	0.021	0.013	0.07
	ฟอกย้อม	0.008	0.006	0.012	0.05
	แปรรูปอาหาร	0.335	0.290	0.327	1.07
5	อิเล็กทรอนิกส์	0.039	0.040	0.038	0.07
	ฟอกย้อม	0.298	0.298	0.312	0.88
	แปรรูปอาหาร	0.140	0.141	0.151	0.39
6	อิเล็กทรอนิกส์	0.051	0.051	0.050	0.16
	ฟอกย้อม	0.015	0.025	0.017	0.05
	แปรรูปอาหาร	0.030	0.038	0.032	0.10
7	อิเล็กทรอนิกส์	0.032	0.037	0.025	0.07
	ฟอกย้อม	0.121	0.118	0.129	0.24
	แปรรูปอาหาร	0.258	0.273	0.259	0.49

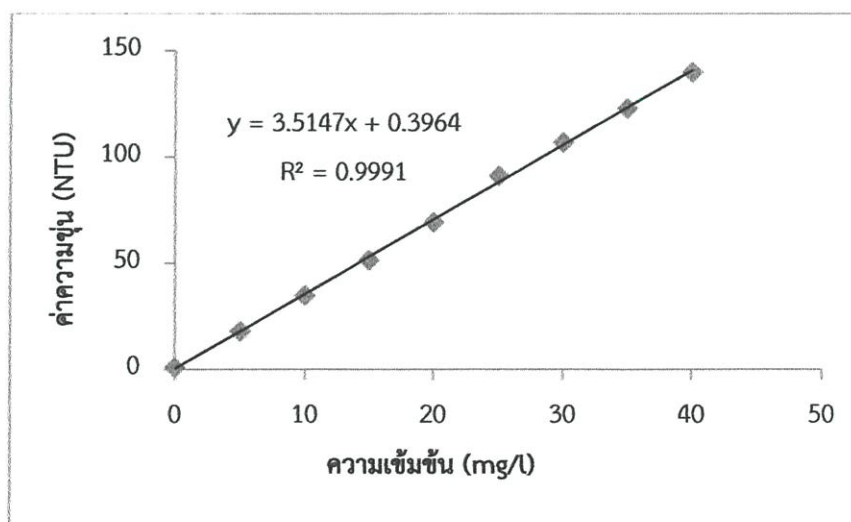
ข.2 ผลการวิเคราะห์ซัลเฟต

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความขุ่นของสารมาตรฐานซัลเฟต

ซัลเฟต(มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าความขุ่น หน่วย NTU								ค่าความ ขุ่นสูงสุด
	30	60	90	120	150	180	210	240	
0	1.02	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	1.02
5	18.00	18.00	18.00	18.10	17.90	17.80	17.80	17.70	18.10
10	34.60	34.80	34.90	34.90	34.80	34.50	34.50	34.20	34.90
15	50.80	51.00	51.40	51.40	51.60	51.60	51.50	51.20	51.60
20	69.40	69.40	69.30	69.30	69.30	69.10	69.10	69.00	69.40
25	90.10	90.10	90.00	91.00	91.20	89.00	89.00	89.00	91.20
30	101.00	103.00	104.00	105.00	107.00	105.00	104.00	104.00	107.00
35	121.00	121.00	121.00	122.00	123.00	122.00	121.00	120.00	123.00
40	138.00	138.00	139.00	139.00	139.00	140.00	140.00	140.00	140.00
ICVS	69.90	70.10	70.20	70.20	70.20	70.10	70.10	69.90	70.20
CCVS	66.90	66.90	67.10	67.10	66.90	66.70	66.60	66.60	67.10

%ความแตกต่าง ICVS 1.15

%ความแตกต่าง CCVS 3.37



รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานค่าความขุ่นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต

ตารางที่ ข-4 ค่าความขุ่นของน้ำเสีย

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้ง ที่	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง หน่วย NTU								ค่าความ ขุ่นสูงสุด
			30	60	90	120	150	180	210	240	
1	อิเล็กทรอนิกส์	1	26.92	26.91	27.00	27.00	27.01	26.91	26.80	26.80	27.01
		2	25.03	25.33	25.42	25.43	25.54	25.74	25.75	25.66	25.75
		3	28.10	28.20	28.20	28.11	28.01	28.02	27.83	27.73	28.20
	ฟอกย้อม	1	91.97	91.95	92.15	92.16	92.16	92.26	92.27	92.17	92.27
		2	96.85	96.84	97.84	98.82	98.83	96.84	96.85	95.78	98.83
		3	83.40	83.60	83.81	83.82	83.72	83.73	83.63	83.63	83.82
	แปรรูปอาหาร	1	33.00	33.10	33.10	33.10	33.30	33.30	33.20	33.20	33.30
		2	49.10	48.80	48.60	48.60	48.40	48.70	48.60	48.50	49.10
		3	47.60	47.80	47.70	47.70	47.90	47.70	47.80	47.60	47.90
2	อิเล็กทรอนิกส์	1	17.50	18.01	18.27	18.94	18.94	18.94	19.04	19.04	19.04
		2	17.36	18.34	18.65	18.62	18.79	18.77	18.85	18.86	18.86
		3	17.64	18.69	18.91	19.04	19.08	19.11	19.06	19.03	19.11
	ฟอกย้อม	1	57.57	59.99	60.34	61.02	61.86	61.71	61.54	61.51	61.86
		2	55.75	55.77	55.83	55.91	56.04	56.09	55.75	55.77	56.09
		3	57.15	58.68	58.91	59.03	59.69	59.74	60.67	60.75	60.75
	แปรรูปอาหาร	1	14.92	15.64	15.75	15.85	15.99	16.13	16.25	16.18	16.25
		2	15.58	16.70	17.73	18.71	19.63	19.88	20.77	21.60	21.60
		3	14.23	14.69	15.12	15.55	15.69	15.63	15.65	15.47	15.69
3	อิเล็กทรอนิกส์	1	16.90	17.69	18.02	18.12	18.23	18.33	18.34	18.29	18.34
		2	14.28	16.33	17.57	18.26	18.57	18.66	18.75	18.85	18.85
		3	20.72	22.70	21.97	26.61	22.63	25.63	25.34	24.29	26.61
	ฟอกย้อม	1	25.19	26.98	27.46	27.36	27.28	27.30	27.31	27.29	27.46
		2	26.47	26.96	27.28	27.38	27.45	27.46	27.46	27.50	27.50
		3	24.71	25.80	27.12	29.12	29.08	28.99	28.90	28.91	29.12
	แปรรูปอาหาร	1	19.79	24.70	23.08	23.37	23.51	23.58	23.55	23.59	24.70
		2	17.68	21.20	21.95	22.43	22.55	22.54	22.63	22.50	22.63
		3	19.30	19.49	20.65	20.91	21.97	22.36	22.60	22.87	22.87

ตารางที่ ข-4 ค่าความขุ่นของน้ำเสีย (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้ง ที่	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง หน่วย NTU								ค่าความ ขุ่นสูงสุด
			30	60	90	120	150	180	210	240	
4	อิเล็กทรอนิกส์	1	25.02	26.34	26.87	27.60	27.81	27.78	27.75	27.73	27.81
		2	21.35	21.62	21.85	21.74	21.86	21.85	21.95	21.95	21.95
		3	20.37	21.76	22.34	22.59	22.71	22.83	22.88	22.75	22.88
	ฟอกย้อม	1	0.54	0.82	1.41	2.05	2.70	3.35	4.11	4.79	4.79
		2	0.10	0.26	1.34	1.29	1.48	2.46	3.43	4.44	4.44
		3	1.62	2.08	2.51	3.21	3.84	4.06	4.55	5.04	5.04
	แปรรูปอาหาร	1	41.06	45.26	49.75	51.97	52.94	53.32	53.82	53.95	53.95
		2	57.99	63.93	65.08	65.39	65.65	65.89	66.03	66.27	66.27
		3	44.49	44.85	48.22	49.67	51.36	52.88	53.51	54.12	54.12
5	อิเล็กทรอนิกส์	1	26.51	29.15	30.16	30.66	31.17	31.27	31.45	31.43	31.45
		2	25.33	27.21	29.90	30.73	31.35	32.15	32.87	33.47	33.47
		3	25.33	27.90	29.32	30.72	31.13	32.44	32.94	33.05	33.05
	ฟอกย้อม	1	56.47	59.09	59.30	59.40	59.41	59.41	59.29	59.30	59.41
		2	60.95	61.95	62.37	62.58	62.69	62.58	62.59	62.59	62.69
		3	60.53	61.04	61.65	61.85	62.16	62.36	62.35	62.56	62.56
	แปรรูปอาหาร	1	12.38	14.90	15.91	16.52	16.83	17.18	17.22	17.45	17.45
		2	7.87	12.24	14.35	15.56	16.27	16.76	17.06	17.47	17.47
		3	13.42	14.23	15.32	15.92	16.12	16.33	16.42	16.42	16.42
6	อิเล็กทรอนิกส์	1	23.92	25.16	25.78	25.82	25.92	26.02	26.03	26.23	26.23
		2	21.50	23.01	23.74	23.94	24.01	24.11	24.22	24.42	24.42
		3	22.38	24.30	24.80	24.91	25.09	25.08	25.21	25.22	25.22
	ฟอกย้อม	1	18.22	23.47	26.57	27.14	28.28	28.47	28.63	29.03	29.03
		2	17.33	18.63	19.33	19.54	21.74	22.85	25.15	26.15	26.15
		3	19.98	21.34	22.54	22.99	23.73	24.43	26.14	27.44	27.44
	แปรรูปอาหาร	1	17.58	22.16	24.55	25.66	26.44	27.12	27.22	27.31	27.31
		2	19.45	24.00	25.18	25.36	25.52	25.59	25.71	25.88	25.88
		3	17.21	21.99	24.17	24.59	24.71	24.88	25.16	25.29	25.29

ตารางที่ ข-4 ค่าความขุ่นของน้ำเสีย (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้ง ที่	ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง หน่วย NTU								ค่าความ ขุ่นสูงสุด
			30	60	90	120	150	180	210	240	
7	อิเล็กทรอนิกส์	1	18.93	20.73	21.24	21.52	21.66	21.66	21.65	21.67	21.67
		2	19.46	21.09	22.42	22.82	22.82	22.93	23.03	23.02	23.03
		3	20.22	21.74	21.65	21.95	21.95	22.06	22.07	22.07	22.07
	ฟอกย้อม	1	31.00	31.56	32.03	32.12	32.16	32.14	32.26	32.14	32.26
		2	31.52	34.16	35.81	36.55	36.89	37.20	37.39	37.49	37.49
		3	31.53	32.40	33.19	33.52	33.93	34.52	34.72	34.81	34.81
	แปรรูปอาหาร	1	7.75	9.00	9.97	10.33	10.68	10.86	10.93	11.10	11.10
		2	9.37	10.35	11.02	11.32	11.24	11.32	11.35	11.30	11.35
		3	8.92	9.70	10.48	10.71	11.02	10.42	10.53	10.52	11.02

ตารางที่ ข-5 ค่าความเข้มข้นซัลเฟตของน้ำเสีย

กลุ่ม อุตสาหกรรม	ความเข้มข้นซัลเฟต (mg/l) ในตัวอย่างที่						
	1	2	3	4	5	6	7
อิเล็กทรอนิกส์	755.21	1006.64	822.24	971.93	1353.22	1003.14	99.50
ฟอกย้อม	103.82	273.57	1168.75	232.06	2427.33	1085.09	142.86
แปรรูปอาหาร	48.75	86.64	98.18	226.11	78.17	103.03	61.15

ข-3 ผลการวิเคราะห์สภาพต่างทั้งหมด

ตารางที่ ข-6 คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

ครั้งที่	ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไป (ml) ในตัวอย่างที่						
	1	2	3	4	5	6	7
1	21.00	20.30	19.50	19.40	19.90	20.20	20.10
2	21.10	20.30	19.60	19.40	20.00	20.20	20.20
3	21.00	21.30	19.50	19.30	19.90	20.30	20.10
เฉลี่ย	21.03	20.63	19.53	19.37	19.93	20.23	20.13

ใช้สารมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต เข้มข้น 0.0200 นอร์มัล ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข-7 สภาพต่างของน้ำเสีย

กลุ่ม อุตสาหกรรม	อินดิเคเตอร์	ครั้งที่	ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไป (ml) ในตัวอย่างที่						
			1	2	3	4	5	6	7
อิเล็กทรอนิกส์	ฟีนอล์ฟธาไลน์	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40
		2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40
		3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.30
		เฉลี่ย	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.37
	เมทิลออเรนจ์	1	13.50	11.20	9.40	9.60	18.10	5.60	22.50
		2	3.50	10.80	9.30	10.70	18.00	5.50	22.50
		3	3.50	10.60	9.50	10.70	18.10	5.40	22.50
		เฉลี่ย	6.83	10.87	9.40	10.33	18.07	5.50	22.50
แปรรูปอาหาร	ฟีนอล์ฟธาไลน์	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		เฉลี่ย	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	เมทิลออเรนจ์	1	11.40	4.60	5.40	3.40	4.40	4.50	6.70
		2	1.30	4.50	5.30	3.60	4.40	4.60	6.70
		3	1.40	4.50	5.30	3.40	4.40	4.60	6.60
		เฉลี่ย	4.70	4.53	5.33	3.47	4.40	4.57	6.67
ฟอกย้อม	ฟีนอล์ฟธาไลน์	1	0.00	40.00	0.00	0.00	0.00	32.20	0.00
		2	0.00	41.00	0.00	0.00	0.00	32.20	0.00
		3	0.00	40.40	0.00	0.00	0.00	32.10	0.00
		เฉลี่ย	0.00	40.47	0.00	0.00	0.00	32.17	0.00
	เมทิลออเรนจ์	1	13.00	63.00	20.50	14.70	10.00	46.20	10.60
		2	13.10	62.60	20.50	14.50	9.40	46.10	10.70
		3	13.10	61.10	20.10	14.50	9.50	46.10	10.70
		เฉลี่ย	13.07	62.23	20.37	14.57	9.63	46.13	10.67

ตารางที่ ข-8 สภาพต่างของน้ำเสียจากการคำนวณ

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม	สภาพต่างจากการคำนวณ (mg/L as CaCO ₃)	
		ทั้งหมด	ฟีนอลฟธาไลน์
1	อิเล็กทรอนิกส์	136.65	0.00
	พอกย้อม	261.29	0.00
	แปรรูปอาหาร	93.99	0.00
2	อิเล็กทรอนิกส์	221.68	0.00
	พอกย้อม	1269.59	825.54
	แปรรูปอาหาร	92.48	0.00
3	อิเล็กทรอนิกส์	203.18	0.00
	พอกย้อม	440.23	0.00
	แปรรูปอาหาร	115.28	0.00
4	อิเล็กทรอนิกส์	219.27	0.00
	พอกย้อม	309.10	0.00
	แปรรูปอาหาร	73.56	0.00
5	อิเล็กทรอนิกส์	366.49	0.00
	พอกย้อม	195.42	0.00
	แปรรูปอาหาร	89.26	0.00
6	อิเล็กทรอนิกส์	110.49	0.00
	พอกย้อม	926.80	646.22
	แปรรูปอาหาร	91.74	0.00
7	อิเล็กทรอนิกส์	456.68	68.33
	พอกย้อม	216.50	0.00
	แปรรูปอาหาร	135.31	0.00

ตารางที่ ข-9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างในน้ำเสีย

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่าง mg/L as CaCO ₃		
		ไฮดรอกไซด์	ไบคาร์บอเนต	คาร์บอเนต
1	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	136.65	0.00
	ฟอกย้อม	0.00	261.29	0.00
	แปรรูปอาหาร	0.00	93.99	0.00
2	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	221.68	0.00
	ฟอกย้อม	381.49	0.00	888.10
	แปรรูปอาหาร	0.00	92.48	0.00
3	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	203.18	0.00
	ฟอกย้อม	0.00	440.23	0.00
	แปรรูปอาหาร	0.00	115.28	0.00
4	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	219.27	0.00
	ฟอกย้อม	0.00	309.10	0.00
	แปรรูปอาหาร	0.00	73.56	0.00
5	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	366.49	0.00
	ฟอกย้อม	0.00	195.42	0.00
	แปรรูปอาหาร	0.00	89.26	0.00
6	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	110.49	0.00
	ฟอกย้อม	365.63	0.00	561.17
	แปรรูปอาหาร	0.00	91.74	0.00
7	อิเล็กทรอนิกส์	0.00	320.02	136.67
	ฟอกย้อม	0.00	216.50	0.00
	แปรรูปอาหาร	0.00	135.31	0.00

ข-4 ผลการวิเคราะห์ความกระด้างทั้งหมด

ตารางที่ ข-10 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของอิตีทีเอ

ครั้งที่	ปริมาณอิตีทีเอที่ใช้ไป (ml) ในตัวอย่างที่						
	1	2	3	4	5	6	7
1	26.20	26.10	24.30	25.90	23.50	25.00	27.30
2	26.10	26.00	24.30	26.00	23.50	25.01	27.30
3	26.10	26.00	24.20	25.90	23.80	25.00	27.20
เฉลี่ย	26.13	26.03	24.27	25.93	23.60	25.00	27.27

ใช้สารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต เข้มข้น 0.0100 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข-11 ความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย

กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้งที่	ปริมาณอิตีทีเอที่ใช้ไป (ml) ในตัวอย่างที่						
		1	2	3	4	5	6	7
อิเล็กทรอนิกส์	1	15.80	10.80	14.90	17.50	21.90	3.40	6.90
	2	15.80	10.50	14.90	17.50	23.90	3.50	6.90
	3	15.40	10.40	15.10	18.00	22.60	3.50	6.80
	เฉลี่ย	15.67	10.57	14.97	17.67	22.80	3.47	6.87
ฟอกย้อม	1	13.80	13.20	30.10	23.80	4.20	27.50	3.10
	2	13.80	13.70	30.10	23.30	4.00	27.30	3.00
	3	13.70	13.50	30.10	21.70	4.30	27.70	3.10
	เฉลี่ย	13.77	13.47	30.10	22.93	4.17	27.50	3.07
แปรรูปอาหาร	1	10.30	4.50	9.00	4.20	3.10	1.20	2.80
	2	9.80	4.40	9.00	4.10	2.90	1.10	2.90
	3	10.80	4.40	9.10	4.10	3.00	1.20	2.80
	เฉลี่ย	10.30	4.43	9.03	4.13	3.00	1.17	2.83

ตารางที่ ข-12 คำนวณหาความกระด้างทั้งหมดของน้ำเสีย

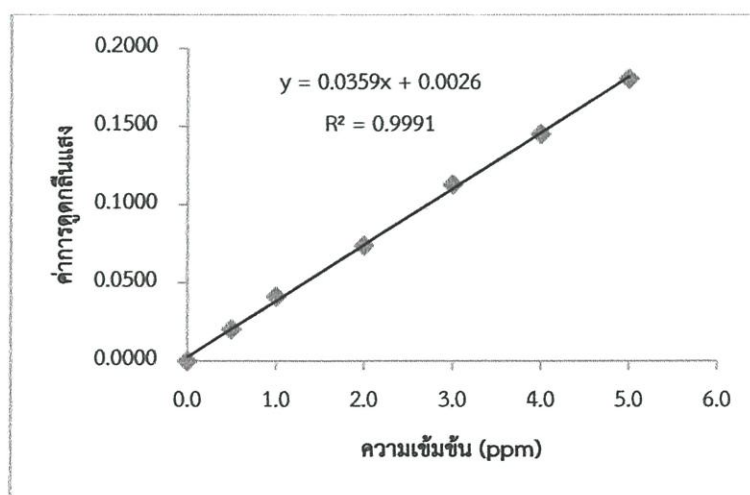
กลุ่ม อุตสาหกรรม	ปริมาณฮิโดรเจนคาร์บอเนตที่ใช้ไป (mg/L as CaCO ₃) ในตัวอย่างที่						
	1	2	3	4	5	6	7
อิเล็กทรอนิกส์	722.15	633.16	780.87	729.87	1011.81	140.19	275.77
ฟอกย้อม	634.57	806.92	1570.43	947.45	184.91	1112.05	123.16
แปรรูปอาหาร	474.78	265.65	471.30	170.76	133.13	47.18	113.79

ข-5 ผลการวิเคราะห์โลหะ แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี

เครื่องมือที่ใช้ Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Analyst 200

ตารางที่ ข-13 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสารละลายมาตรฐานแคลเซียม

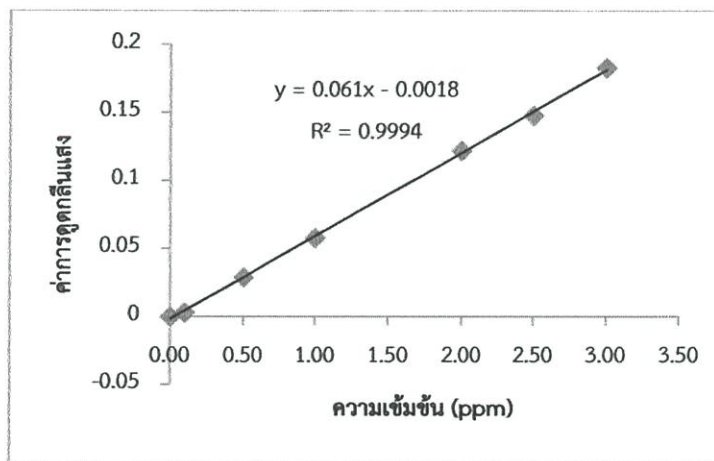
ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.0	0.0000
0.5	0.0202
1.0	0.0413
2.0	0.0739
3.0	0.1129
4.0	0.1454
5.0	0.1806



รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแคลเซียม

ตาราง ข-14 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสารละลายมาตรฐานเหล็ก

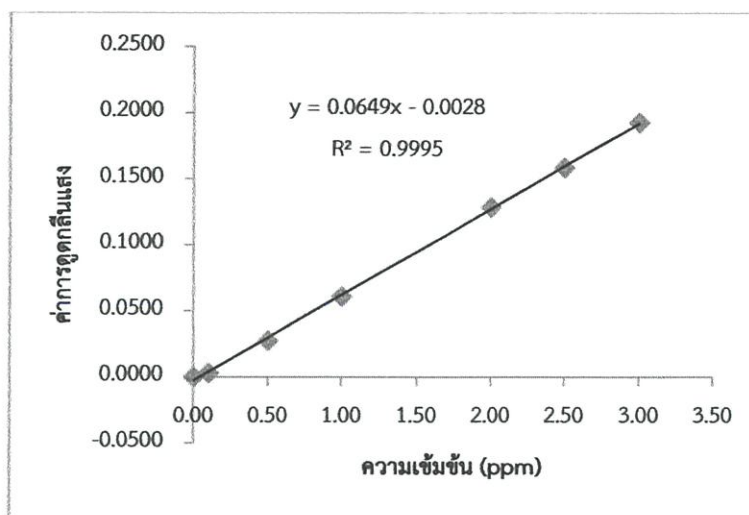
ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0
0.10	0.003
0.50	0.029
1.00	0.058
2.00	0.122
2.50	0.148
3.00	0.183



รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานเหล็ก

ตาราง ข-15 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสังกะสี

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0.0000
0.10	0.0031
0.50	0.0276
1.00	0.0610
2.00	0.1286
2.50	0.1584
3.00	0.1927



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานเหล็ก

ตารางที่ ข-16 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 422.7 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 248.3 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 213.9 nm
1	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.106	0.002	0.012
		2	0.105	0.002	0.008
		3	0.108	0.002	0.009
	ฟอกย้อม	1	0.061	0.002	0.013
		2	0.063	0.002	0.010
		3	0.063	0.002	0.011
	แปรรูปอาหาร	1	0.040	0.013	0.051
		2	0.040	0.012	0.035
		3	0.039	0.011	0.026
2	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.162	0.031	0.074
		2	0.166	0.021	0.023
		3	0.150	0.014	0.015
	ฟอกย้อม	1	0.075	0.007	0.003
		2	0.073	0.007	0.005
		3	0.069	0.006	0.003
	แปรรูปอาหาร	1	0.102	0.001	0.002
		2	0.108	0.001	0.002
		3	0.111	0.001	0.003

ตารางที่ ข-16 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 422.7 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 248.3 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 213.9 nm
3	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.070	0.007	0.009
		2	0.071	0.007	0.007
		3	0.070	0.006	0.006
	ฟอกย้อม	1	0.092	0.003	0.007
		2	0.093	0.003	0.008
		3	0.096	0.003	0.006
	แปรรูปอาหาร	1	0.108	0.001	0.002
		2	0.115	0.001	0.001
		3	0.113	0.001	0.003
4	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.092	0.004	0.009
		2	0.094	0.003	0.007
		3	0.096	0.004	0.011
	ฟอกย้อม	1	0.079	0.006	0.008
		2	0.075	0.005	0.009
		3	0.074	0.005	0.011
	แปรรูปอาหาร	1	0.097	0.003	0.009
		2	0.093	0.003	0.007
		3	0.097	0.003	0.007
5	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.059	0.004	0.004
		2	0.060	0.004	0.003
		3	0.059	0.003	0.007
	ฟอกย้อม	1	0.048	0.008	0.007
		2	0.041	0.008	0.007
		3	0.040	0.008	0.007
	แปรรูปอาหาร	1	0.128	0.007	0.005
		2	0.129	0.008	0.004
		3	0.128	0.008	0.002

ตารางที่ ข-16 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างในน้ำเสีย (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 422.7 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 248.3 nm	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 213.9 nm
6	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.028	0.014	0.020
		2	0.024	0.012	0.018
		3	0.022	0.012	0.021
	ฟอกย้อม	1	0.131	0.014	0.003
		2	0.131	0.010	0.004
		3	0.133	0.007	0.001
	แปรรูปอาหาร	1	0.016	0.025	0.018
		2	0.015	0.016	0.020
		3	0.014	0.012	0.016
7	อิเล็กทรอนิกส์	1	0.110	0.007	0.004
		2	0.111	0.007	0.004
		3	0.111	0.007	0.003
	ฟอกย้อม	1	0.028	0.013	0.036
		2	0.028	0.013	0.031
		3	0.028	0.013	0.035
	แปรรูปอาหาร	1	0.027	0.005	0.008
		2	0.026	0.004	0.010
		3	0.025	0.004	0.009

ตารางที่ ข-17 ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย

ตัวอย่าง ที่	กลุ่ม อุตสาหกรรม	ความเข้มข้นของ แคลเซียม (ppm)	ความเข้มข้นของ เหล็ก (ppm)	ความเข้มข้นของ สังกะสี (ppm)
1	อิเล็กทรอนิกส์	234.47	1.07	0.27
	ฟอกย้อม	125.98	1.07	0.32
	แปรรูปอาหาร	70.08	2.59	1.06
2	อิเล็กทรอนิกส์	430.93	3.90	1.00
	ฟอกย้อม	183.35	1.39	0.15
	แปรรูปอาหาร	28.20	0.46	0.12
3	อิเล็กทรอนิกส์	177.66	1.39	0.25
	ฟอกย้อม	244.06	0.78	0.24
	แปรรูปอาหาร	29.62	0.46	0.11
4	อิเล็กทรอนิกส์	245.01	0.89	0.29
	ฟอกย้อม	193.78	0.92	0.30
	แปรรูปอาหาร	24.98	0.78	0.25
5	อิเล็กทรอนิกส์	146.35	0.89	0.18
	ฟอกย้อม	99.87	1.60	0.24
	แปรรูปอาหาร	34.27	1.55	0.15
6	อิเล็กทรอนิกส์	61.50	0.24	0.06
	ฟอกย้อม	359.75	0.20	0.02
	แปรรูปอาหาร	34.56	3.15	0.05
7	อิเล็กทรอนิกส์	301.21	0.15	0.02
	ฟอกย้อม	70.79	0.24	0.09
	แปรรูปอาหาร	65.22	1.10	0.03

ข-6 ผลการวิเคราะห์ภาคสนามของน้ำตัวอย่าง

ตารางที่ ข-18 ผลการวิเคราะห์ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/l)

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม		
	พอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กทรอนิกส์
1	1310.00	817.00	2420.00
2	3610.00	3190.00	3040.00
3	5140.00	2090.00	3730.00
4	5070.00	1945.00	4510.00
5	3529.00	493.00	2119.00
6	3830.00	3865.00	1982.00
7	758.00	525.00	381.00
ค่าเฉลี่ย	3320.94	1846.34	2597.36
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1701.30	1328.42	1334.81

ตารางที่ ข-19 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชของน้ำเสีย

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม		
	พอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กทรอนิกส์
1	7.65	6.67	7.93
2	11.44	6.39	7.74
3	7.46	6.40	7.57
4	7.02	6.74	7.73
5	6.90	6.70	8.15
6	11.38	6.39	7.60
7	8.00	6.90	8.42
ค่าเฉลี่ย	8.55	6.60	7.88
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.99	0.21	0.31

ตารางที่ ข-20 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ (°C) ของน้ำเสีย

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม		
	ฟอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กทรอนิกส์
1	39.50	30.60	32.20
2	40.10	30.00	32.80
3	44.80	64.60	28.10
4	41.80	29.40	33.20
5	39.80	29.90	31.40
6	38.00	28.50	31.30
7	42.10	28.40	30.80
ค่าเฉลี่ย	40.87	34.49	31.40
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.22	13.30	1.69

ตารางที่ ข-21 ผลการวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (ms/cm) ของน้ำเสีย

ตัวอย่างที่	กลุ่มอุตสาหกรรม		
	ฟอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กทรอนิกส์
1	2.63	1.63	4.82
2	7.22	7.94	6.07
3	10.30	4.21	7.46
4	10.14	3.89	9.02
5	7.41	1.04	4.45
6	7.67	7.73	3.97
7	1.52	1.05	0.76
ค่าเฉลี่ย	6.70	3.93	5.22
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.41	2.96	2.66

ข-7 ผลการคำนวณดัชนีแลงเกิลียร์และดัชนีโรนาร์

ตารางที่ ข-22 วิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ดัชนีแลงเกิลียร์และดัชนีโรนาร์

	กลุ่มอุตสาหกรรม		
	ฟอกย้อม	แปรรูปอาหาร	อิเล็กทรอนิกส์
A	0.252	0.227	0.241
B	1.590	1.708	1.766
C	2.486	1.979	2.388
D	2.713	1.995	2.389
pH _s	5.943	7.260	6.530
LSI	2.607	-0.662	1.347
RSI	3.336	7.922	5.184

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณ

ค-1 การคำนวณดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์

$$pH_s = (9.3+A+B)-(C+D)$$

$$LSI = pH - pH_s$$

$$RSI = 2pH_s - pH$$

เมื่อ $A = (\log (TDS)-1)/10$

$$B = (-13.2 \log (°C + 273.15)) + 34.55$$

$$C = \log (Ca\text{-Hardness}) - 0.4$$

$$D = \log (M\text{-Alkalinity})$$

ค-2 การคำนวณความเข้มข้นซัลเฟต

$$[SO_4^{2-}] \text{ mg/L} = \frac{\text{ปริมาณซัลเฟตในน้ำ 100 mL (mg)} \times 1000}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

ค-3 การคำนวณความเข้มข้นฟอสเฟต

$$\text{ฟอสเฟต (มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมที่อ่านได้จากกราฟ (ในปริมาตรสุดท้าย 58 mL)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

ค-4 การคำนวณสภาพต่างทั้งหมด

$$\text{สภาพต่างทั้งหมด (mg/l) CaCO}_3 = \frac{T \times N \times 50,000}{\text{ml น้ำตัวอย่าง}}$$

$$\text{สภาพต่างฟีนอล์ฟทาลีน (mg/l) CaCO}_3 = \frac{P \times N \times 50,000}{\text{ml น้ำตัวอย่าง}}$$

ตารางที่ ค-1 ความสัมพันธ์ของสภาพต่าง

ความสัมพันธ์ ระหว่าง P กับ T	สภาพต่าง		
	ไฮดรอกไซด์	ไบคาร์บอเนต	คาร์บอเนต
$P = T$	$\frac{P \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$	0	0
$P > T/2$	$\frac{(2P-T) \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$	0	$\frac{2(T-P) \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$
$P = T/2$	0	0	$\frac{2P \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$
$P < T/2$	0	$\frac{(T-2P) \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$	$\frac{2P \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$
$P = 0$	0	$\frac{T \times N \times 50,000}{\text{มิลลิลิตรน้ำตัวอย่าง}}$	0

ค-5 การคำนวณความกระด้างทั้งหมด

$$\text{Hardness (EDTA) mg/l as CaCO}_3 = \frac{A \times B \times 1,000}{C}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของอิตีทีเอที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

B = ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (ml) ที่สมมูลกับปริมาตรของอิตีทีเอ 1.00 (ml)

C = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง

ค่า B คำนวณได้จากสูตร

$$B = \frac{V_{\text{CaCO}_3, \text{mL}} \times C_{\text{CaCO}_3, \text{M}} \times \text{Mw}_{\text{CaCO}_3}}{V_{\text{EDTA}, \text{mL}} - V_{\text{Blank}, \text{mL}}}$$

เมื่อ $V_{\text{CaCO}_3, \text{mL}}$ = ปริมาตรของสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (ml)

$V_{\text{CaCO}_3, \text{M}}$ = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (M)

$\text{Mw}_{\text{CaCO}_3}$ = มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต = 100 g/mol

$V_{\text{EDTA}, \text{mL}}$ = ปริมาตรของอิตีทีเอที่ใช้ไทเทรตกับแคลเซียมคาร์บอเนต (ml)

$V_{\text{Blank}, \text{mL}}$ = ปริมาตรของอิตีทีเอที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (ml)

ค-6 การคำนวณความเข้มข้นของโลหะ

$$\text{ความเข้มข้นโลหะของน้ำตัวอย่าง (ppm)} = \frac{\text{ความเข้มข้นโลหะที่อ่านได้จากเครื่อง (ppm)} \times \text{ปริมาตรที่ใช้วิเคราะห์ (ml)}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)}}$$

ค-7 การคำนวณของแข็งแขวนลอย

$$\text{Suspended Solids (mg/l)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{mL of sample}}$$

เมื่อ mL of sample = ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง

ค-8 การคำนวณค่าเฉลี่ย

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

เมื่อ \bar{X} = ค่าเฉลี่ย
 $\sum X$ = ผลรวมของข้อมูลทุกค่า
 n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค-9 การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{S.D.} = \sqrt{\frac{N \sum X^2 - (\sum X)^2}{N(N-1)}}$$

เมื่อ S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 $\sum X^2$ = ผลรวมของข้อมูลยกกำลังสอง

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ
โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ง-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นฟอสเฟต

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	0.2650	0.13249	1.57	0.234
Error	18	1.5153	0.08418		
Total	20	1.7802			

ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นฟอสเฟตในแต่ละอุตสาหกรรมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ง-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นซัลเฟต

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	2424561	1212280	4.13	0.033
Error	18	5286927	293718		
Total	20	7711488			

ค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นซัลเฟตในแต่ละอุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Means

C1	N	Mean	StDev
1	7	776	854
2	7	100.3	58.7
3	7	859	385

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
3	7	859	A
1	7	776	A
2	7	100.3	B

Means that do not share a letter are significantly different

จากการวิเคราะห์ผลหาความแตกต่างถึงความเข้มข้นซัลเฟตในเส้นท่อน้ำที่พบว่า แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กับอุตสาหกรรมพอกย้อมไม่แตกต่างกัน และกลุ่มที่สองอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

ง-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความกระด้างทั้งหมด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	1035244	517622	4.05	0.035
Error	18	2298701	127706		
Total	20	3333945			

ค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความกระด้างทั้งหมดในแต่ละอุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Means

C1	N	Mean	StDev
1	7	768	511
2	7	239.5	172.5
3	7	613	303

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
1	7	768	A
3	7	613	A
2	7	239.5	B

Means that do not share a letter are significantly different.

จากการวิเคราะห์ผลหาความแตกต่างถึงความกระด้างทั้งหมดในเส้นท่อน้ำที่พบว่า แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กับอุตสาหกรรมฟอกย้อม ไม่แตกต่างกัน และกลุ่มที่สองอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

ง-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสภาพต่างทั้งหมด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	1035244	517622	4.05	0.035
Error	18	2298701	127706		
Total	20	3333945			

ค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของสภาพต่างทั้งหมดในแต่ละอุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Means

C1	N	Mean	StDev
1	7	517	417
2	7	98.80	20.19
3	7	244.9	124.1

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
1	7	517	A
3	7	244.9	A
2	7	98.80	B

Means that do not share a letter are significantly different.

จากการวิเคราะห์ผลหาความแตกต่างถึงสภาพต่างทั้งหมดในเส้นท่อน้ำที่พบว่า แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กับอุตสาหกรรมฟอกย้อม ไม่แตกต่างกัน และกลุ่มที่สองอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

ง-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	7611458	3805729	1.77	0.198
Error	18	38645143	2146952		
Total	20	46256601			

ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในแต่ละอุตสาหกรรมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ง-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอุณหภูมิ

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	326.7	163.34	2.65	0.098
Error	18	1108.6	61.59		
Total	20	1435.3			

ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละอุตสาหกรรมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ง-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าพีเอช

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	13.76	6.878	5.04	0.018
Error	18	24.56	1.365		
Total	20	38.32			

ค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแคลเซียมในแต่ละอุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Means

C1	N	Mean	StDev
1	7	8.550	1.989
2	7	6.5986	0.2052
3	7	7.877	0.312

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
1	7	8.550	A
3	7	7.877	A
2	7	6.5986	B

Means that do not share a letter are significantly different.

จากการวิเคราะห์ผลหาความแตกต่างถึงพีเอชในเส้นท่อน้ำที่พบว่า แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กับอุตสาหกรรมพอกย้อม ไม่แตกต่างกัน และกลุ่มที่สองอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร โดยที่กลุ่มแรกมีพีเอชสูงกว่ากลุ่มที่สอง

ง-8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นแคลเซียม

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	133342	66671	8.35	0.003
Error	18	143700	7983		
Total	20	277041			

ค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแคลเซียมในแต่ละอุตสาหกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

Means

C1	N	Mean	StDev
1	7	182.5	98.2
2	7	40.99	18.57
3	7	228.2	118.2

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
3	7	228.2	A
1	7	182.5	A
2	7	40.99	B

Means that do not share a letter are significantly different.

จากการวิเคราะห์ผลหาความแตกต่างถึงความเข้มข้นแคลเซียมในเส้นท่อน้ำที่พบว่า แบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กับอุตสาหกรรมพอกย้อม ไม่แตกต่างกัน และกลุ่มที่สองอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร โดยที่กลุ่มแรกมีปริมาณแคลเซียมสูงกว่ากลุ่มที่สอง

ง-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นเหล็ก

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	1.085	0.5423	0.54	0.590
Error	18	17.969	0.9983		
Total	20	19.053			

ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นเหล็กในแต่ละอุตสาหกรรมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่ต้องเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อว่าอุตสาหกรรมใดมีความเข้มข้นของเหล็กสูงที่สุด

ง-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความเข้มข้นสังกะสี

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	2	0.03724	0.01862	0.22	0.804
Error	18	1.52022	0.08446		
Total	20	1.55746			

ค่า P-Value > 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นสังกะสีในแต่ละอุตสาหกรรมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่ต้องเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อว่าอุตสาหกรรมใดมีความเข้มข้นของสังกะสีสูงที่สุด

ง-11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความกระต้างและสภาพต่างของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

Polynomial Regression Analysis: C2 versus C1

The regression equation is $C2 = -2625 + 17.90 C1 - 0.02302 C1^2 + 0.000009 C1^3$ ได้สมการถดถอย

เมื่อ C2 คือ ความกระต้างทั้งหมด

C1 คือ สภาพต่างทั้งหมด

S = 109.679, R-Sq = 97.7%, R-Sq(adj) = 95.4%

Analysis of Variance

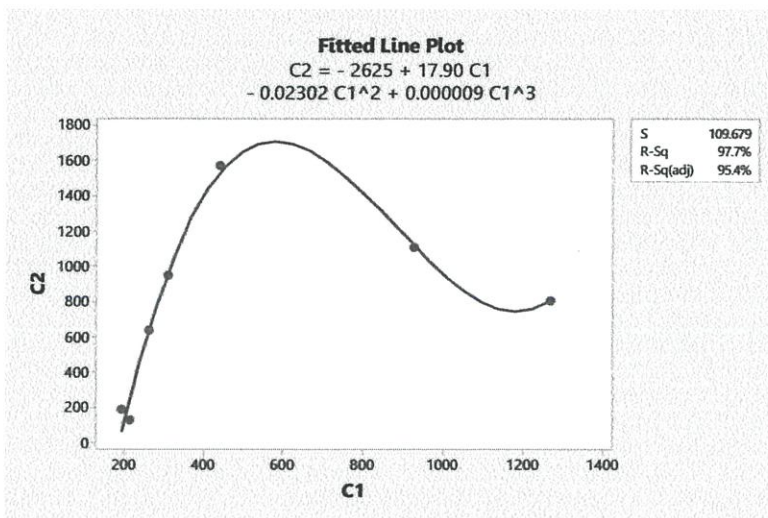
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	3	1533522	511174	42.49	0.006
Error	3	36089	12030		
Total	6	1569610			

ค่า $P < 0.05$ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความกระต้างและสภาพต่าง ไม่เป็นอิสระต่อกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
Linear	1	227288	0.85	0.400
Quadratic	1	872369	7.43	0.053
Cubic	1	433865	36.07	0.009

จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 แบบ เส้นตรงและควอดราติก ค่า $P > 0.05$ แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่จะเห็นว่า คิวบิกหรือโพลีโนเมียล มีค่า $P < 0.05$ แสดงว่ามีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลมากที่สุด



ง-12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความกระด้างและสภาพต่างของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

Polynomial Regression Analysis: C2 versus C1

The regression equation is $C2 = 12510 - 404.1 C1 + 4.285 C1^2 - 0.01460 C1^3$ ได้สมการถดถอย

เมื่อ C2 คือ ความกระด้างทั้งหมด

C1 คือ สภาพต่างทั้งหมด

S = 168.217, R-Sq = 52.5%, R-Sq(adj) = 4.9%

Analysis of Variance

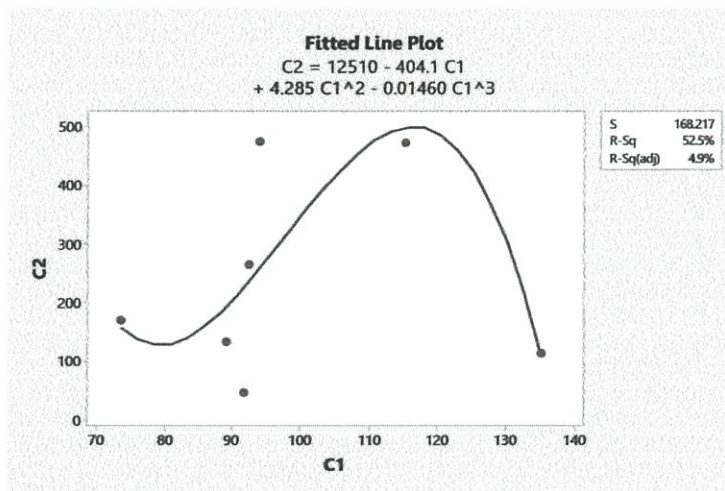
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	93712	31237.2	1.10	0.469
Error	3	84890	28296.8		
Total	6	178602			

ค่า $P > 0.05$ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างและสภาพต่าง เป็นอิสระต่อกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
Linear	1	1700.7	0.05	0.835
Quadratic	1	40440.7	1.19	0.337
Cubic	1	51570.3	1.82	0.270

จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 แบบ เส้นตรงและควอดราติก ค่า $P > 0.05$ แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันในการถดถอยรูปแบบนั้น แต่จะเห็นว่า คิวบิกหรือโพลิโนเมียลมีค่าน้อยที่สุด จึงคาดว่ามีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลมากที่สุด



ง-13 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความกระด้างและสภาพต่างของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

Polynomial Regression Analysis: C2 versus C1

The regression equation is $C2 = 157 - 1.35 C1 + 0.03350 C1^2 - 0.000065 C1^3$ ได้สมการถดถอย

เมื่อ C2 คือ ความกระด้างทั้งหมด

C1 คือ สภาพต่างทั้งหมด

$S = 229.033$, $R-Sq = 71.4\%$, $R-Sq(adj) = 42.8\%$

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	393120	131040	2.50	0.236
Error	3	157369	52456		
Total	6	550489			

ค่า $P > 0.05$ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างและสภาพต่าง เป็นอิสระต่อกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
Linear	1	3642	0.03	0.862
Quadratic	1	357232	7.54	0.490
Cubic	1	32246	0.61	0.052

จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 แบบ เส้นตรง และควอดรติก ค่า $P > 0.05$ แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันในสมการถดถอยรูปแบบนั้น แต่จะเห็นว่า คิวบิกหรือโพลิโนเมียลมีค่าน้อยที่สุด จึงคาดว่ามีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลมากที่สุด

