



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาเครื่องวัดความขุ่นของน้ำแบบพกพาเพื่อประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปา
ท้องถิ่น

Development Portable Turbidity Meter for Application in Local Water Treatment
Plant

นามผู้วิจัย นางสาวรัตนภรณ์ เทพมาลัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนันทน์, D.Eng.

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องวัดความขุ่นของน้ำแบบพกพาเพื่อประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาท้องถิ่น

Development Portable Turbidity Meter for Application in Local Water Treatment Plant

โดย

นางสาวรัตนภรณ์ เทพมาลัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

รัตนภรณ์ เทพมลัย 2553: การพัฒนาเครื่องวัดความขุ่นของน้ำแบบพกพาเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาท้องถิ่น ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล จานุดตมวงศ์, Ph.D.
106 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบผลิตน้ำประปาท้องถิ่น กรณีศึกษาโรงผลิตน้ำประปา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร มีกำลังการผลิต 150
ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้โพลีลูมินัม คลอไรด์ (PACl) เป็นสารสร้างตะกอน โดยศึกษาเฉพาะ
กระบวนการกวนเร็วและกวนช้า จากการศึกษาและคำนวณความเร็วแรงแผ่นเฉือน และระยะเวลาการ
กวน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมกับความขุ่นน้ำดิบ ทำการ
ทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ กำหนดช่วงความขุ่น 10-60 NTU จากการทดลองพบว่าปริมาณ PACl ที่
เหมาะสมต่อกระบวนการเท่ากับ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความขุ่นน้ำดิบช่วง 10-40 NTU ซึ่ง
เป็นความขุ่นส่วนมากของอ่างสกลนคร แต่ค่าความขุ่นน้ำดิบที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการคือ
ช่วงระหว่าง 30-45 NTU เนื่องจากช่วงนี้ต้องการปริมาณ PACl เพียง 11.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

อีกส่วนหนึ่งมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเครื่องวัดความขุ่นต้นแบบที่ราคาถูก วัสดุที่ใช้
หาง่ายในท้องถิ่น การประดิษฐ์ใช้หลักการทางสเปกโทรสโกปี และการกระเจิงแสงของอนุภาค
อุปกรณ์หลักประกอบด้วยหลอดไส้เป็นแหล่งกำเนิดแสง หลอดไส้ตัวอย่างเป็นหลอดแก้ว
ทรงกระบอก แผ่นกรองแสง และตัวต้านทานไวแสงหรือแอลดีอาร์ เป็นตัววัดสัญญาณแสง
แสดงผลออกมาในรูปค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า การทดลองใช้น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นจากดินคาโอ
ลิน ช่วงความขุ่นระหว่าง 0-100 NTU วัดความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่นรุ่น 2100 AN ของบริษัท
HACH จากนั้นนำมาวัดความต่างศักย์จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ นำผลการทดลองมาสร้างกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Rattanaorn Tepmalai 2010: Development Portable Turbidity Meter for Application in Local Water Treatment Plant. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 106 pages.

The purpose of this research was to study local water production and treatment plant through case study of water treatment plant in Kasetsart University Chalermphrakit Sakon Nakhon Province Campus. The plant has manufacture rate of $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ using polyaluminum chloride (PACl) as coagulant. This research focuses on studying the process of rapid and slow mixing. Calculation velocity gradient and mixing time are use to for find relationship between optimum dose versus raw water's turbidity using jar test with estimate turbidity of raw water between 10-60 NTU. The experiment found that optimum dose of PACl that is suitable for the system is 13 mg/L for turbidity between 10-40 NTU, which is the turbidity for most of Sakon Nakhon's lake. However, the most suitable turbidity for the procedure is between 30-45 NTU because it has an optimum dose of only 11.25 mg/L.

Furthermore, this research is to design a low cost prototype model of turbidity meter using readily accessible local material. This invention use principle of spectroscopy and scattering light's particles. The main materials consist of tungsten lamp as a light source, glass cylinder for sample cell or cuvette, filter and light dependent resistor (LDR) as a detector of light signal which converts to corresponding voltage. The experiment uses water using synthetic raw water prepared from Kaolin clay at turbidity between 0-100 NTU. HACH's turbidity meter type 2100 AN is uses to measure turbidity, follow with voltage measurement by the invented device. The results from experiment are then graph to show relationship between turbidity versus voltage.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล
ฐานุตตมวงศ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนายปรัชญา จันทร์ศักดิ์ เจ้าหน้าที่วิจัย ที่ช่วยประดิษฐ์อุปกรณ์วัดความชื้น
เพื่อนๆ พี่ๆ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน

ที่สำคัญที่สุดข้าพเจ้าขอกราบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน ที่คอย
ให้ความรัก กำลังใจ และโอกาสในการศึกษาต่อปริญญาโทในครั้งนี้

ท้ายที่สุดข้าพเจ้าขอขอบประ โยชน์แต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ทุกท่าน และหวังว่าเนื้อหา
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้า
ขออภัยมา ณ ที่นี้

รัตนกรณ เทพมลัย

เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	88
สรุป	88
ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	90
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก รายการคำนวณระบบผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	95
ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราค่าจ่ายสารสร้างตะกอน	100
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ข้อมูลความขุ่นน้ำประเภทต่างๆ	7
2 ระดับความระคายของน้ำ	10
3 การเปรียบเทียบความเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ	11
4 การจำแนกประเภทของระบบคอลลอยด์แบบต่างๆ	12
5 แหล่งกำเนิดกลิ่นที่ให้ออกมาเป็นแถบของกลิ่นที่ต่อเนื่องกันเป็นช่วงกลิ่นกว้างๆ	31
6 พารามิเตอร์ และการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบ	42
7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์	44
8 ค่าการคำนวณพารามิเตอร์ของการกวนช้าแบบ Baffled Channel	52
9 ค่า GT แต่ละ Stage ของการกวนช้าแบบ Baffled Channel	56
10 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองจาร์เทสต์ของกระบวนการสร้างตะกอน	58
11 ปริมาณสารสร้างตะกอน (PACI) และค่าความขุ่นสุดท้าย	69
12 การปรับ % ป้อนจ่ายสารเคมี และค่าความขุ่นน้ำดิบ	71
13 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟیلเตอร์สีแดง	78
14 การคำนวณเทียบค่าความขุ่น และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟیلเตอร์สีแดง	78
15 การวิเคราะห์ห่มตัวด้านทาน	79
16 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟیلเตอร์สีน้ำเงิน	81
17 การคำนวณเทียบค่าความขุ่น และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟیلเตอร์สีน้ำเงิน	82
18 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟیلเตอร์เครื่อง 2100 AN	84
19 การคำนวณเทียบค่าความขุ่น และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟیلเตอร์เครื่อง 2100 AN	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
20 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้ฟิลเตอร์ต่างๆ	86
ตารางผนวกที่	
ก1 พารามิเตอร์ของการกวนซ้ำ	99
ข1 ปริมาณการจ่ายสารสร้างตะกอน	101

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 Electrical Double Layer Theory	13
2 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะต่างๆ	14
3 ผลการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์	16
4 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACl และ alum	19
5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำอาร์เรสต์	25
6 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	29
7 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดคลื่นแสง	30
8 ลักษณะของแบรีเออร์-แลเซอร์เซลล์ หรือโฟโตโวลตาอิกเซลล์	33
9 หลอดรับแสงและวงจรไฟฟ้า	34
10 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (PMT)	35
11 Jackson Turbidimeter	38
12 Burgess-Parr turbidimeter	39
13 Betz-Helige turbidimeter and diagrammatic view	39
14 General Electric Luximeter	40
15 ลักษณะของตัวต้านทานไวแสง	46
16 โครงสร้างของเครื่องวัดความขุ่น	47
17 การต่อวงจร LDR	48
18 ค่าความขุ่นน้ำดิบ	58
19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ	59
20 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ	60
21 ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ	60
22 ความกระด้างของน้ำดิบ	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 สภาพความเป็นต่างของน้ำดิบ	62
24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 10 NTU	63
25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 15 NTU	63
26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 20 NTU	64
27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 25 NTU	64
28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 30 NTU	65
29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 35 NTU	65
30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 40 NTU	66
31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 45 NTU	66
32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 50 NTU	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 55 NTU	67
34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นสุดท้าย ของน้ำดิบ 60 NTU	68
35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นของน้ำดิบ ช่วง 10-60 NTU	69
36 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นและความต่างศักย์ไฟฟ้า	73
37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอด LED	74
38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์	75
39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 12 โวลต์	76
40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟิวเตอร์สีแดง	76
41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟิวเตอร์สีน้ำเงิน	80
42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟิวเตอร์เครื่อง 2100 AN	83
 ภาพผนวกที่	
ข1 ปุ่มสารส้ม	105

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PACI	=	โพลิอูมินัมคลอไรด์
G	=	ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน, วินาที ⁻¹
P	=	พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน, วัตต์
μ	=	ความหนืดของน้ำ, นิวตัน-วินาที/ ตารางเมตร
V	=	ปริมาตรของน้ำ, ลูกบาศก์เมตร
nm	=	นาโนเมตร
LED	=	หลอดไดโอดเปล่งแสง
LDR	=	ตัวต้านทานไวแสง
λ	=	ความยาวคลื่น

การพัฒนาเครื่องวัดความขุ่นของน้ำแบบพกพาเพื่อประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปา ท้องถิ่น

Development Portable Turbidity Meter for Application in Local Water Treatment Plant

คำนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่สำคัญแบ่งออกเป็นน้ำผิวดิน (Surface Water) และน้ำใต้ดิน (Ground Water) ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะทางภูมิประเทศ หรือสภาพแวดล้อมที่แหล่งน้ำไหลผ่าน แหล่งน้ำที่นำมาใช้ประโยชน์มากสำหรับการอุปโภคบริโภคคือน้ำผิวดิน มักมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำใต้ดิน คุณสมบัติจึงขึ้นกับแหล่งน้ำเดิมไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้โดยตรง เพราะอาจมีสารบางอย่าง หรือ เชื้อโรคปนเปื้อน ดังนั้นควรมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีความเหมาะสมก่อนนำไปใช้

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการผลิตน้ำประปา มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความขุ่นที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สี เชื้อโรค สารที่ก่อให้เกิดรสและกลิ่น มีการเติมสารเคมีไปทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นสาเหตุของความขุ่น ในขั้นตอนของการกวนเร็ว (Rapid mixing) แล้วทำการกวนช้า (Slow mixing) ในกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพนั้น เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือที่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) ตกตะกอนแยกออกจากน้ำใส จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการกรอง และฆ่าเชื้อโรคต่อไป

สำหรับโรงผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เป็นระบบผลิตน้ำประปาขนาดเล็ก ขั้นตอนการกวนเร็วเป็นการกวนในเส้นท่อเพื่อสร้างความปั่นป่วนทางชลศาสตร์ ทำการรวมตะกอนในถังกวนช้าแบบแผ่นกั้นขวาง (Baffler Channel) ระบบจะค่อยๆลดความปั่นป่วนทางชลศาสตร์ลง เพื่อให้ตะกอนได้มีโอกาสจับตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น สารสร้างตะกอนที่ใช้คือ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl) เป็นสารสร้างตะกอนที่ได้รับความนิยมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เริ่มใช้ที่ประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในยุโรป เนื่องจากเป็นสารสร้างตะกอนที่ดีและมีประโยชน์มากกว่าสารส้ม (Dempsey *et al.*, 1985) และยัง

สามารถใช้ที่อุณหภูมิต่ำได้ (Simpson และคณะ, 1988) นอกจากนี้ PACI ยังทำให้อนุภาคคอลลอยด์ เกิดเป็นกลุ่มตะกอนที่แข็งแรงกว่า และตกตะกอนง่ายกว่าใช้สารส้ม (Nilsson, 1992)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของกระบวนการกวนเร็วและกวนช้าของระบบ จากนั้นจึงจำลองระบบโดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ เพื่อหาปริมาณ PACI ที่เหมาะสม และเพียงพอในกระบวนการสร้างตะกอน โดยสัมพันธ์กับค่าความขุ่นน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา และเนื่องจากความขุ่นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตน้ำประปา ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะในการตรวจวัด ปัจจุบันยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นต้นแบบ โดยวัสดุที่ใช้หาได้ง่าย และราคาถูก การประดิษฐ์ใช้หลักการทางสเปกโทรสโกปี และการกระเจิงแสงของอนุภาค (Scattering of particles) เพื่อเป็นแนวทางให้แก่โรงผลิตน้ำประปาท้องถิ่น นำแนวความคิดนี้ไปประดิษฐ์หรือประยุกต์ใช้ นอกจากนี้ยังอาจนำแนวความคิดไปพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องวัดความขุ่นโดยฝีมือคนไทย เป็นการลดปัญหาเรื่องการขาดดุลทางการค้า และยังส่งเสริมความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นดับแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการประดิษฐ์ให้กับชุมชน โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น
2. เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ (Velocity Gradient, G) ที่ใช้ในการออกแบบระบบผลิตน้ำประปา เฉพาะในส่วนระบบการกวนเร็วและการกวนช้า ของโรงผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
3. นำค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่ได้จากระบบจริง มากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีจาร์เทสต์

ขอบเขตการศึกษา

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องตลาด หลักการทำงานไม่ซับซ้อน ทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์จากดินคาโอลิน ในช่วงความขุ่นระหว่าง 0-100 NTU
2. การศึกษาระบบผลิตน้ำประปาท้องถิ่น กรณีศึกษาโรงผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ศึกษาเฉพาะระบบการสร้างและกวนตะกอน
3. ใช้ค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลาการกวนจากระบบจริง เป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับความขุ่นน้ำดิบ จากวิธีจาร์เทสต์ ช่วงความขุ่น 10-60 NTU
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำกับปริมาณสารสร้างตะกอนที่ต้องใช้ในการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบ ของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

การตรวจเอกสาร

คุณภาพน้ำประปา

น้ำประปาต้องมีคุณภาพดี ปราศจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ดังนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งน้ำดิบที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน และต้องมีระบบการควบคุมการผลิตที่ได้มาตรฐานตลอดเวลา คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำประปา ได้แก่ ความขุ่น ตะกอน รส กลิ่น สี โดยปกติแล้วสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือสัมผัสได้ คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ สารเคมีและแร่ธาตุต่างๆ ที่อาจปะปนอยู่ในน้ำ ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับคุณสมบัติทางชีววิทยา ได้แก่ เชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้อาจไม่ก่อให้เกิดโรค แต่อาจทำให้เกิดรส กลิ่น สีได้ และเชื้ออาจก่อให้เกิดโรคอันตรายต่างๆ เช่น อหิวาตกโรค บิด โทฟอยด์ ฯลฯ ดังนั้นน้ำดื่มต้องไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ปนเปื้อนอยู่ในส่วนนี้จะได้กล่าวเฉพาะเนื้อหาที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

1. คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพเป็นคุณสมบัติที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น น้ำมีความขุ่นมาก มีรสเค็มหรือรสกร่อย มีกลิ่นไม่พึงประสงค์

1.1 สี (Color)

สีที่เกิดขึ้นในน้ำประปาหรือน้ำทั่วไปจะมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สีปรากฏ (Apparent Color) คือสีที่เกิดขึ้นจากสารตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำ เช่น พวกเศษดิน เศษแร่ธาตุที่ไม่ละลายน้ำ เป็นต้น สีแบบนี้อาจมีสีน้ำตาล สีแดง สีเทา ฯลฯ ขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนที่ลอยอยู่ในน้ำ และสีจริง (True Color) เกิดขึ้นจากพวกไบโอมัส พืชผัก หรือสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ เป็นพวกสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter หรือ NOM)

1.2 กลิ่นและรส (Odour and Taste)

สำหรับน้ำประปาส่วนมากจะเกิดจากคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นและรส นอกจากนี้ยังน้ำมีอุณหภูมิสูงก็ยิ่งทำให้เกิดกลิ่นและรส มีความรุนแรงขึ้น สำหรับน้ำดื่มควรมี

ค่า Threshold Oder Number (TON) ไม่เกิน 3.0 เพราะถ้ามีค่ามากกว่านี้จะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจต่อผู้บริโภคได้ สำหรับรสชาติของน้ำสามารถวัดได้ด้วยผลออกมาเป็นรสหวาน รสเค็ม รสขม ฯลฯ

1.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิของน้ำมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำประปา คือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับน้ำดิบ ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำจะต้องการสารเคมีในการผลิตน้ำประปามากขึ้น และจะมีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำประปาต่ำกว่าน้ำอุ่น และถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำก็จะต้องการคลอรีนน้อยกว่าน้ำอุ่น สำหรับมาตรฐานของน้ำดื่มไม่ได้บ่งชี้ค่าอุณหภูมิของน้ำ

1.4 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นของน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากสารพวกที่แขวนลอยในน้ำ เช่น ดิน โคลน ทรายละเอียด และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจำพวกสาหร่ายเซลล์เดียว แพลงก์ตอน และไดอะตอม ซึ่งสามารถทำให้แสงหักเหและอาจดูดกลืนแสงไม่ให้ทะลุผ่าน ทำให้มองเห็นน้ำมีลักษณะขุ่น ในแหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะสงบนิ่ง ความขุ่นมักเกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีของแม่น้ำในฤดูน้ำหลาก น้ำท่วม หรือกระแสน้ำปั่นป่วน ความขุ่นเกิดจากของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ และความขุ่นเป็นลักษณะเฉพาะของน้ำผิวดินเท่านั้น เนื่องจากการสัมผัสกันระหว่างน้ำผิวดินกับสิ่งต่างๆบนผิวโลก

ระดับความขุ่นในน้ำ หมายถึงปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์แขวนลอยจำนวนมากจะใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่า และตกตะกอนดีกว่าเนื่องจากมีเป่าสัมผัสมากกว่าน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่า O' Melia (1972) ซึ่งปัจจุบันวัดค่าความขุ่นออกมาในหน่วย NTU (Nephelometric Turbidity Units) สำหรับมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก ได้กำหนดไว้ว่าน้ำดื่มควรมีค่าความขุ่นไม่เกิน 5 NTU และมีค่าความขุ่นที่ยอมให้มีได้สูงสุดไม่เกิน 25 NTU

ตารางที่ 1 ข้อมูลความขุ่นของน้ำประเภทต่างๆ

น้ำประเภทต่างๆ	ความขุ่น (NTU)
น้ำผิวดินที่มีความขุ่นมาก	1000
แม่น้ำทั่วไป	100
ทะเลสาบ	10
หลังจากผ่านระบบ Coagulation และ Flocculation แล้ว	1.5
หลังจากผ่านเครื่องกรองแล้ว	0.1

ที่มา : เกรียงศักดิ์ (2541)

2. คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีเป็นคุณสมบัติที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือสัมผัสอื่นๆ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางปฏิกิริยา เมื่อทราบผลการวิเคราะห์น้ำแล้ว จึงสามารถบอกได้ว่าน้ำมีคุณภาพไปในลักษณะใด จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดเป็นน้ำประปาด้วยวิธีใด ช่วยในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการเติมผสมลงไปให้น้ำดิบ

2.1 pH

pH เป็นค่าวัดความเข้มข้นของ H^+ ในน้ำ โดย H^+ นี้เกิดจากการแตกตัวของกรดในน้ำ และอาจถูกทำลายด้วยสารละลายด่าง น้ำบริสุทธิ์ควรมี pH เท่ากับ 7.0 หมายถึง น้ำที่มีสภาพเป็นกลาง จากมาตรฐานน้ำดื่มของการประปานครหลวง กำหนดค่า pH ของน้ำดื่มควรอยู่ในช่วง 6.8 ถึง 8.2

2.2 สภาพความเป็นกรด (Acidity)

สภาพกรด หมายถึงความสามารถของน้ำที่จะให้ H^+ สามารถทำให้น้ำที่มีสภาพความเป็นกรดให้เป็นกลางได้ โดยเติมด่างผสมลงไปจนได้น้ำที่มีสภาพเป็นกลาง (pH เท่ากับ 7.0) หน่วยที่ใช้แสดงขนาดความเป็นกรด คือ มก./ลิตร ของ $CaCO_3$ และ มก./ลิตร ของ CO_2 สภาพความเป็น

กรดจะมีกรดอยู่ 2 ประเภท คือ กรดอ่อน (Carbon Dioxide Acidity) เกิดจากการบอนด์ออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนประกอบ pH ของน้ำจะอยู่ระหว่าง 4.5 – 8.3 อีกประเภทหนึ่งคือ กรดแร่ (Mineral Acidity) เกิดจากกรดแก่ เช่น H_2SO_4 , HCl สาเหตุที่ก่อให้เกิดน้ำมีสภาพความเป็นกรดมีดังนี้

1. CO_2 จากบรรยากาศละลายลงไปในน้ำ
2. พวกรีด Humic และ Tannic ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์
3. จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยมากจะเป็นพวกรีดแก่

2.3 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างของน้ำเป็นการวัดความสามารถของน้ำในการสะเทินกรด โดยสามารถทำให้น้ำที่มีสภาพความเป็นด่างให้เป็นกลางได้ โดยเติม H_2SO_4 หรือ HCl ผสมลงไป หน่วยที่นิยมใช้แสดงขนาดความเป็นด่าง คือ มก./ลิตร ของ CaCO_3 ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปจะมี สภาพความเป็นด่าง ซึ่งมีพวกไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) พวกคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และพวกไฮดรอกไซด์ (OH^-) พบว่าน้ำทั่วไปจะมีพวกไบคาร์บอเนต เป็นตัวที่สำคัญต่อการมีสภาพความเป็นด่างของน้ำ

น้ำที่มีสภาพความเป็นด่างจะมีความสำคัญต่อระบบประปา ดังต่อไปนี้

1. สภาพความเป็นด่างของน้ำดิบที่จะนำมาผลิตน้ำประปาควรมีอย่างต่ำ 30 มก./ลิตร ของ CaCO_3 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการเกิด Coagulation ที่ดี
2. ผลของค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำดิบ จะถูกใช้ในการคำนวณหาปริมาณของปูนขาว และอื่นๆ สำหรับกระบวนการลดความกระด้างของน้ำ (Softening)
3. ถ้าน้ำมีสภาพความเป็นด่างสูงๆ จะไม่มีผลโดยตรงต่อผู้บริโภค น้ำที่มีสภาพเป็นด่างสูง จะทำให้น้ำมีค่า pH สูงส่งผลให้ความกระด้างสูง และมีค่าตะกอนละลายน้ำ (TDS) สูงด้วยให้เป็นน้ำที่ไม่สามารถดื่มได้

4. ผลของค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำ จะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาความกัดกร่อน หรือ การเกิดตะกอนขึ้น

2.4 ความกระด้าง (Hardness)

ความกระด้างในน้ำเกิดจากไอออนของโลหะที่มีประจุ $2+$ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} เป็นต้น โดยธรรมชาติของชั้นใต้ดินจะมีพวกแคลเซียม(Ca^{2+}) และแมกนีเซียม(Mg^{2+}) มากที่สุด เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติจะพบพวกโลหะอื่นๆ ได้น้อยมาก

ความกระด้างของน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามไอออนลบที่จับรวมอยู่กับ แคลเซียมและแมกนีเซียม คือ

1. ความกระด้างชั่วคราว หรือความกระด้างคาร์บอเนต (Temporary Hardness or Carbonate Hardness) ความกระด้างของน้ำจะประกอบด้วย Ca^{2+} และ Mg^{2+} ไปรวมกับพวกไอออนลบที่เป็นพวก Alkalinity คือ HCO_3^- , CO_3^{2-} และ OH^-
2. ความกระด้างถาวร หรือความกระด้างไม่มีคาร์บอเนต (Permanent Hardness or Noncarbonate Hardness) ความกระด้างของน้ำจะประกอบด้วย Ca^{2+} และ Mg^{2+} ไปรวมกับไอออนลบที่เป็นพวก SO_4^{2-} , Cl^- และ NO_3^- ตารางที่ 2 ได้แสดงระดับความกระด้างของน้ำ โดยทั่วไปน้ำกระด้างจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย แต่น้ำประปาควรมีความกระด้างไม่เกิน 100 มก./ลิตร ของ CaCO_3

ตารางที่ 2 ระดับความกระด้างของน้ำ

ประเภทของน้ำ	ระดับความกระด้าง (มก./ลิตร ของ CaCO_3)
น้ำอ่อน	0-40
น้ำกระด้างพอประมาณ	40-100
น้ำกระด้าง	100-300
น้ำกระด้างมาก	300-500
น้ำกระด้างมากเกินไป	> 500
น้ำดื่มของการประปานครหลวง	ห้ามเกิน 300
น้ำใช้ที่ครอบครัวพอใจ	75-100

ที่มา : เกரியศักดิ์ (2541)

2.5 ปริมาณของแข็ง (Solids)

ปริมาณของแข็งในน้ำหมายถึง ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำรวมกับปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\text{TS} = \text{TSS} + \text{TDS}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \text{TS} &= \text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด, มก./ลิตร} \\ \text{TSS} &= \text{ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ, มก./ลิตร} \\ \text{TDS} &= \text{ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ, มก./ลิตร} \end{aligned}$$

ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ นิยมเรียกว่า Total Suspended Solids (TSS) เป็นของแข็งที่ลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า สำหรับน้ำประปา ค่านี้ไม่นิยมใช้วัดหาค่า เพราะจะมีน้อยมาก ดังนั้นจะนิยมใช้ค่าความขุ่นเป็นตัววัดแสดงความใสหรือไม่ใสของน้ำประปา

ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำเรียกว่า Total Dissolved Solids (TDS) เป็นของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ ไม่สามารถมองเห็นได้ เมื่อพิจารณาเฉพาะน้ำประปา ค่า TDS โดยมากจะมาจากสารอนินทรีย์ที่มาจากแร่ธาตุต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำประปา

คอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Partical) เป็นอนุภาคขนาดเล็กมีขนาดระหว่าง 10^{-6} มม. (1 nm) จนถึง 10^{-3} มม. (1 ไมครอน) จึงไม่ตกตะกอนได้ด้วยตนเองในเวลาจำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการจับกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆจนเป็นก้อน เรียกว่า ฟล็อก (Floc) ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่าย กระบวนการทำให้เกิดฟล็อกเรียกว่า โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ

สารต่างๆ	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	เวลาที่ต้องการในการตกตะกอน ไกล 1 เมตร
กรวด	10	1 วินาที
ทรายหยาบ	1	10 วินาที
ทรายละเอียด	10^{-1}	2 นาที
ตะกอนดินเหนียว	10^{-2}	2 ชม.
แบคทีเรีย	10^{-3}	8 วัน
คอลลอยด์	10^{-4}	2 ปี
คอลลอยด์	10^{-5}	20 ปี
คอลลอยด์	10^{-6}	200 ปี

ที่มา : Sawyer and McCarty (1976)

การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานๆไม่ตกตะกอน เรียกว่าเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง จึงทำให้น้ำขุ่น และสกปรก ดังนั้นต้องทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เพื่อทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและน้ำหนัก มากขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้

ระบบคอลลอยด์ หมายถึงระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลางซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว (Continuous Medium) อนุภาคต่าง ๆ นั้น เรียกว่า Dispersed Phase ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า Dispersing Phase หรือ Dispersed Medium ระบบคอลลอยด์เกิดจากการรวมตัวของสสารทั้ง 3 สถานะได้ ดังแสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การจำแนกประเภทของระบบคอลลอยด์แบบต่างๆ

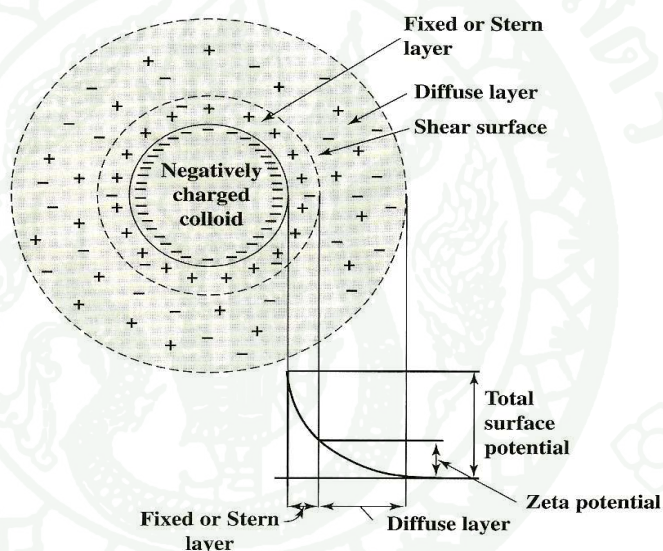
Disperse medium	Disperse phase	Name	Example
Liquid	Solid	Sol	Clay turbidity in water
Liquid	Liquid	Emulsion	Oil in water
Liquid	Gas	Foam	Whipped cream
Gas	Solid	Aerosol	Dust, smoke
Gas	Liquid	Aerosol	Mist, fog
Solid	Solid		Colored glass
Solid	Liquid	Gel	Jelly
Solid	Gas		Pumice

ที่มา : Sawyer and McCarty (1976)

ลักษณะที่สำคัญของคอลลอยด์ คือ ผิวสัมผัสระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ทำให้น้ำหนักไม่มีความสำคัญเท่ากับพื้นที่ผิวของสาร ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน เรียกว่า Hydrophobic เป็นอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ เช่นดินเหนียว แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง เรียกว่า Hydrophilic เป็นอนุภาคที่ชอบน้ำ เช่นสารอินทรีย์ สบู่ และผงซักฟอก ดังนั้นคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิก สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก เนื่องจากคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิกมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกัน เพราะมีโมเลกุลของน้ำกีดขวางไม่ให้อนุภาค เคลื่อนที่เข้าใกล้และจับตัวกัน

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer Theory พิจารณาอนุภาคดินเหนียว ซึ่งมีประจุลบที่สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ไอออนบวกที่อยู่ในน้ำวิ่ง

เข้าหา ทำให้ไอออนบวกมารวมกันใกล้ผิวคอลลอยด์ ไอออนบวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของไอออนบวกจะสูงที่สุดบริเวณที่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป ตามทฤษฎี Double Layer เชื่อว่าไอออนบวกชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เพราะมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์ และจุดศูนย์กลางของไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด คล้ายมีชั้นทรงกลมบางกั้นขวางอยู่ ซึ่งเรียกว่า Stern Layer ศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นนี้มีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนชั้นนอกเรียกว่า Diffuse Layer (ชั้นกระจาย) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นใน ไปจนถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจพอติ (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

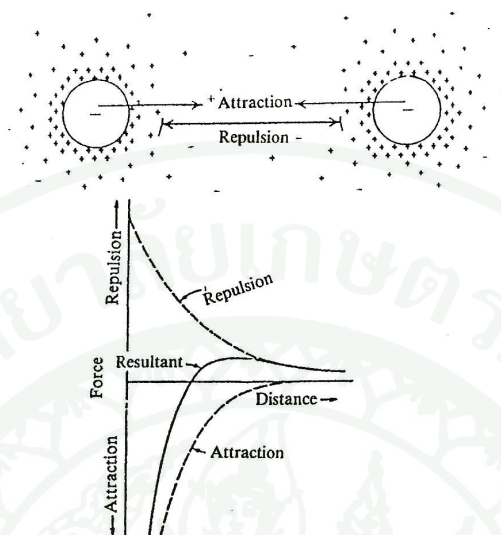


ภาพที่ 1 Electrical Double Layer Theory

ที่มา : Sawyer *et al.* (2003)

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคได้ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van Der Waals Force เป็นแรงอ่อนๆที่มีผลลัพท์ระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค (ภาพที่ 2) จะเห็นว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้วแรง

ผลึกที่เกิดจากซีตาโพเทนเชียลไม่ยอมให้อนุภาคต่างๆเข้ามาใกล้กันจนเกิดการดึงดูดซึ่งกันและกันได้



ภาพที่ 2 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะต่างๆ

ที่มา : Sawyer and McCarty (1976)

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลึกและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลึกเกิดจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ ส่วนแรงดึงดูดเป็นแรง Van Der Waals ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคนาโนและของโมเลกุล แรงผลึกที่มากกว่าแรงดึงดูดจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ แต่ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลึกคอลลอยด์จะสูญเสียเสถียรภาพ และไม่สามารถแขวนลอยในน้ำได้

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์อาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1. โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย

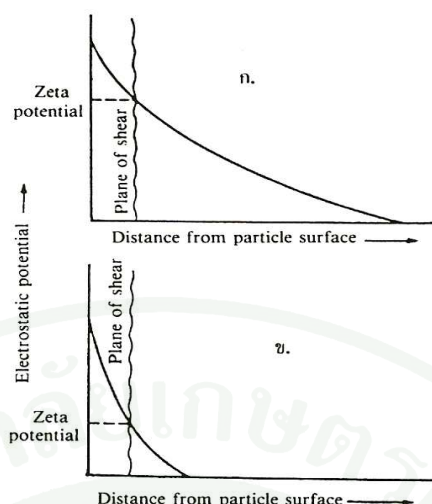
การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย โดยทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงไปด้วย การลดโมเลกุลของน้ำในสารประกอบคอมเพล็กซ์ (Aqua Complex) ช่วยทำให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น การทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีนี้พบว่าปริมาณสารนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์ และไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (Charge Reversal)

2. โดยการทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (กลไกแบบดูดติด)

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกนี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก 3 ประการ คือ ต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่า, การทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีนี้เป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) คือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ และกลไกแบบดูดติดสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) ถ้าใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไป เสถียรภาพของคอลลอยด์จะกลับคืนใหม่เนื่องจากการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น

3. โดยการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงในน้ำในปริมาณหนึ่งที่พอเพียงจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ถือว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือนำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ โคแอกกูแลนต์ เช่น สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3), แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3), ปูนขาว (CaCO_3) และโพลีลูมินัมคลอไรด์ (PACl) สามารถสร้างผลึกสารที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้เรียกว่าเป็น Sweep Floc Coagulation หรือ Sweep Coagulation หรือการห่อหุ้มคอลลอยด์



ภาพที่ 3 ผลการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติม (ข) หลังเติม

ที่มา : Sawyer and McCarty (1976)

4. โดยการใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารโพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม การเชื่อมต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ครบเท่าที่มีโพลิเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลิเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะจับบนอนุภาคเดิม ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกโพลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Partical)

การสร้างตะกอน

การสร้างตะกอน (coagulation) หมายถึงการเติมสารเคมีลงไปทำให้เกิดการไม่อยู่ตัว (destabilization) ด้วยการไปลดแรงที่ผลักดันระหว่างอนุภาคต่างๆ ในน้ำลง หรือคือการทำให้อนุภาคเล็กๆ จับตัวกันเกิดเป็นมวลรวมที่ใหญ่ขึ้น (larger aggregates) การสร้างตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อ

เติมสารเคมีลงไปแล้วใช้การกวนเร็ว (Rapid mixing) เพื่อช่วยให้สารเคมีกระจายอย่างทั่วถึง (Uniform dispersion) ทำให้โอกาสที่อนุภาคเล็กๆ ในน้ำรวมตัวกันได้มากขึ้น (โกมล และคณะ, 2534)

องค์ประกอบที่มีผลต่อการรวมตัวกันของตะกอน

1. พี เอช (pH)

น้ำแต่ละชนิดจะมีช่วง พี เอช ที่จะเกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ดีต่างกัน การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ในช่วง พีเอช ไม่เหมาะสม จะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้และน้ำที่ได้มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร

2. เกลือของสาร

น้ำดิบตามธรรมชาติมักจะมีเกลืออนินทรีย์ละลายอยู่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของช่วง พี เอช ที่เหมาะสม ระยะเวลาที่จับตัวเป็นตะกอน ปริมาณสารสร้างตะกอน (coagulant dose) ที่พอเหมาะ และปริมาณของสารเคมีสร้างตะกอนในน้ำที่จ่ายออกเพิ่มขึ้น

3. ความขุ่น

ความขุ่นของน้ำส่วนมากมาจากดินเหนียว และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งมีขนาดที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจนถึงขนาดเล็กมาก 0.2-5.0 ไมครอน หรือเป็นพวกอนุภาคคอลลอยด์ มีการค้นพบว่าน้ำที่มีความขุ่นมากอาจใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนน้อยเมื่อเทียบกับน้ำที่มีความขุ่นน้อย (water Quality & Treatment, 1971)

4. สารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมสำหรับทำลายความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ต้องพิจารณาถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่

เกิด ความเร็วของการตกตะกอน และความยากง่ายในการใช้งาน ที่สำคัญในการเลือกใช้สารสร้างตะกอนต้องมีการทดลองในห้องปฏิบัติการก่อน

5. การกวน

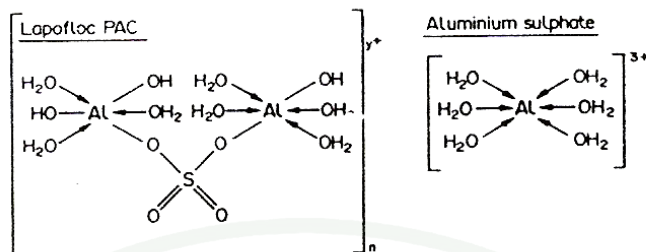
กระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่าง คือ ถังกวนเร็ว (Rapid Mixing Tank) และถังกวนช้า (Flocculation Tank) ถังกวนเร็วมีการเติมโคแอกกูแลนต์ จะทำหน้าที่กระจายสารเคมีให้ทั่วถึงและรวดเร็ว โดยการกวนเร็ว (Rapid mixing) ช่วยทำให้สารเคมีกระจายไปทั่วถึงใช้เวลา 30-60 วินาที ส่วนถังกวนช้ามีหน้าที่สร้างสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เพื่อให้รวมตัวกันเป็นฟล็อก ใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที (มันสิน, 2527)

สารสร้างตะกอน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรือ ฟลอคคูแลนต์ (Flocculant) สารเคมีที่ช่วยให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดีขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (coagulant aid) หรือฟลอคคูแลนต์เอ็ด (Floccilant aid) โดยสารเคมีประเภทนี้จะใช้เพียงตำปึงไม่ได้

โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum Chloride, PACl)

Polyaluminum Chloride หรือ PACl เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา เป็นที่นิยมในประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปยุโรป PACl ถูกเตรียมโดยอลูมิเนียมในรูป Al_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้รวมตัวเป็น $AlCl_3$ จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมโพลิเมอร์ เมื่อเติมสารส้มลงไป ในสารละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือ 10-11 % และเติมซัลเฟอร์ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม สูตรทั่วไปของ PACl คือ $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}$ เมื่อ $0 < m < 3n$ ดังภาพที่ แสดงโครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACl และ alum (Hundt and O'Melia, 1988 ; Viraraghavan and Wimmer, 1988)



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACI และ alum

ที่มา : Viraraghavan and Wimmer (1988)

เมื่อละลายน้ำจะไฮโดรไลซ์เป็นสารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมมากมาย ตัวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ $(Al_{13}O_4(OH)_{24})^{7+}$ โดยสารประกอบนี้มีคุณสมบัติเป็นเกลือเบสและมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้มีคุณสมบัติจับตัวสูงและมีเสถียรภาพมาก ลักษณะทั่วไปของ PACI อาจอยู่ในรูปของสารละลายใส หรือขุ่นเล็กน้อย และอาจอยู่ในรูปของผงละเอียดสีขาว ซึ่งการรวมตัวเป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนตัวนี้ขึ้นอยู่กับระดับการรวมตัวของด่างกับสารละลายอลูมิเนียม ชนิดและความเข้มข้นของด่าง ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ อุณหภูมิ ปัจจัยสำคัญที่สุดคือปริมาณด่างที่เติมลงไป และระดับของความเป็นกลาง (Kaeding et al., 1992)

คุณสมบัติของ PACI เมื่อเป็นสารสร้างตะกอน

1) มีอำนาจในการสร้างและรวมตะกอนสูง การตกตะกอนเป็นไปอย่างรวดเร็ว และตะกอนที่ได้แข็งแรงกว่าการใช้สารส้ม ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงดีกว่า (Nilsson, 1992)

2) สะดวกในการใช้งานเนื่องจากละลายน้ำได้ดี

3) PACI มีช่วงพีเอชในการเกิดปฏิกิริยากว้างกว่าสารสร้างตะกอนตัวอื่น ปกติแล้วช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนอยู่ในช่วง 6-9 แต่บางกรณีสามารถตกตะกอนในช่วงพีเอช 5-10 ได้

4) PACI สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม โดยที่ใช้ระยะเวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า

PACI ใช้ได้ดีกว่าสารส้มเมื่อพีเอชสูงกว่า หรือต่ำกว่าพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม ดังนั้น PACI จึงมีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำ และที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำถึงปานกลางพบว่า PACI เป็นสารสร้างตะกอนที่ดีกว่าสารส้ม โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5 หรือมากกว่า 7 (Dempsey, 1985; Keading, 1992; Packham and Ratnayaka, 1992; Povillot and Suty, 1992)

ประสิทธิภาพของ PACI ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ และได้ผลในน้ำที่มีความเป็นด่าง ความขุ่นสูง (>30 NTU) โดยเฉพาะในสภาพอากาศหนาว (Simpson *et al.*, 1988) ถึงแม้ว่า PACI จะมีราคาแพงกว่าสารส้มแต่ก็ใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า (Kawamura and Trussell, 1991)

น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะมีความขุ่นอยู่ในระดับที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ head loss ของระบบการกรองอยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารส้ม (Kaeding *et al.*, 1992)

ใช้ได้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้ (Simpson *et al.*, 1988 ; Pouillot and Suty, 1992) ทำให้เกิดการรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์เกิดเป็นกลุ่มตะกอนได้เร็ว และมีความแข็งแรงกว่าและตกตะกอนได้เร็วกว่าการใช้สารส้ม (Nilsson, 1992 ; Packham and Ratnayaka, 1992)

เมื่อใช้ PACI เป็นสารสร้างตะกอน จะไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารช่วยเร่งให้ตกตะกอน (coagulant aid) (Packham and Ratnayaka, 1992; Pouillot and Suty, 1992)

ภายหลังการบำบัดแล้ว น้ำที่ได้จะมีพีเอชไม่ต่ำมากเหมือนกับการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน (Simpson *et al.*, 1988) และ PACI สามารถลดสีในน้ำได้ (Simpson *et al.*, 1988)

การนำ PACI มาใช้เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำ ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงเครื่องมือหรืออุปกรณ์อื่นๆ (Viraraghavan and Wimmer, 1988) รวมทั้งไม่ต้องเปลี่ยนแปลงจุดที่จะใส่สารสร้างตะกอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ (Kaeding *et al.*, 1992)

PACI จะทำให้มีอูมิเนียมตกค้างในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้สารส้ม ทั้งนี้เนื่องจากอูมิเนียมละลายกลับออกมาจาก PACI ในปริมาณที่น้อยกว่า (Simpson *et al.*, 1988 ; Kaeding *et al.*, 1992 ; Pouillot and Suty, 1992)

มีปริมาณของ sludge ในปริมาณมากกว่าการใช้สารส้ม แต่เมื่อคิดในน้ำหนักแห้งแล้วจะมีน้ำหนักน้อยกว่าสารส้ม (Kaeding *et al.*, 1992) และในประเทศญี่ปุ่นได้นำเอา sludge ที่แห้งแล้วไปถมที่ (landfill) หรือใช้เป็นตัวช่วยบำรุงดิน (soil conditioner) และอาจนำไปเป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Kawamura and Trussell, 1991)

นำไปใช้กับน้ำที่มีค่าความเป็นด่างต่ำและความขุ่นสูงได้ อีกทั้งยังใช้ PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้สารส้ม (Kawamura and Trussell, 1991) และยังสามารถนำมาใช้กำจัดความขุ่นในน้ำที่เป็นน้ำอ่อนได้ (Dempsey *et al.*, 1985)

Dempsey *et al.* (1985) ทำการทดลองและรายงานว่ค่าความเข้มของสารแขวนลอยต่ำถึงปานกลางพบว่า PACI เป็นสารสร้างตะกอนที่ดีกว่าสารส้ม โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5 หรือมากกว่า 7

Viraraghavan and Wimmer (1988) ได้ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของสารส้ม และ PACI ที่อุณหภูมิ 7, 10 และ 20 °C พบว่าในการกำจัดความขุ่นนั้น PACI มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 1/3 ถึง 2/3 ของปริมาณสารส้ม และ PACI สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าการใช้สารส้มร้อยละ 20 ในทุกๆอุณหภูมิที่ทดสอบ ซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ใช้สารโพลีเมอร์ป็นสารช่วยในการตกตะกอน และสามารถใช้ PACI ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม นอกจากนี้คุณสมบัติของน้ำภายหลังการบำบัดยังมีพีเอชสูงกว่าการใช้สารส้ม ทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำภายหลังด้วย

Hundt and O' Melia (1988) ทำการทดลองพบว่า PACI สามารถกำจัด fulvic acid ที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่ำได้ดีกว่าการใช้สารส้ม และ PACI มีความเหมาะสมที่จะใช้กับน้ำที่มีสารอินทรีย์และพีเอชต่ำ เพราะทำให้ใช้ PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าสารสร้างตะกอนที่เป็นอูมิเนียมอื่นๆ

แม้ว่า PACI จะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารสร้างตะกอน แต่ก็มีราคาแพงกว่าสารส้ม 2.5-3 เท่า ถึงแม้ว่าจะช่วยประหยัดเรื่องการปรับพีเอชและ โพลีเมอร์ที่จะต้องเติมลงไปก็ตาม (Viraraghavan and Wimmer, 1988)

การรวมตะกอน

การทำฟล็อกคูเลชัน เป็นการทำให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกัน (เรียกว่า การสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่างๆ) อนุภาคที่สัมผัสกันแล้วจะต้องเกาะติดกันจนเป็นกลุ่มก้อน หรือฟล็อก จึงจะถือว่าเกิดฟล็อกคูเลชัน ปกติแล้วระบบที่มีการทำลายเสถียรภาพอย่างสมบูรณ์ จะมีประสิทธิภาพหรือความสำเร็จในการสร้างสัมผัส (η) เท่ากับ 100% แต่ถ้ามีการเติมสารส้มหรือโคแอกกูแลนต์อื่นๆ ไม่เพียงพอหรือพีเอชไม่เหมาะสม หรือสาเหตุอื่นๆ ที่ทำให้มีการทำลายเสถียรภาพไม่สมบูรณ์ ค่า η จะมีค่าไม่ถึง 100% หมายความว่าอนุภาคที่สัมผัสกันไม่จำเป็นต้องเกาะจับกันเสมอไป (มันสิน, 2527)

วิธีสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่างๆ มีหลายวิธี ดังนี้

Orthokinetic Flocculation

เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีที่นิยมคือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกันทำให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป เพราะจะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกและหลุดออกจากกันได้

Perikinetic Flocculation

การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Motion) เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ ในทางปฏิบัติฟล็อกคูเลชันแบบเพอริไคเนติกไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากต้องเสียเวลานานมากเกินไป นอกจากนี้การเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลดังกล่าว ทำให้สามารถสร้าง

สัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า $0.1 - 1$ ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของการสร้างสัมผัสแบบนี้คือ ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก

Differential Setting

การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอน ที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคขนาดต่างๆ ฟลอคคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้อนุภาคที่สามารถสร้างฟลอคคูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟลอคคูเลชันมาก่อนครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงถึงตกตะกอนจึงเกิดฟลอคคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

การควบคุมกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอน เป็นกระบวนการกวนเร็วเพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำดิบและสารสร้างตะกอนอย่างรวดเร็วและทั่วถึง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นหรือคอลลอยด์ ปัจจัยสำคัญที่ใช้ออกแบบเครื่องมือในการกวนเร็วคือ ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient, G) เป็นความเร็วที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำ คำนวณได้จากสมการของแคมป์และสไตน์ ดังนี้

$$G = \sqrt{\left(\frac{P}{\mu V}\right)}$$

เมื่อ G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน, วินาที⁻¹

P = พลังงานที่ใช้ในการความปั่นป่วน, วัตต์

μ = ความหนืดของน้ำ, นิวตัน-วินาที/ ตารางเมตร

V = ปริมาตรของน้ำ, ลูกบาศก์เมตร

สำหรับกระบวนการรวมตะกอน เป็นกระบวนการกวนช้ามีจุดประสงค์ให้ความขุ่นหรือคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเข้ามาจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถ

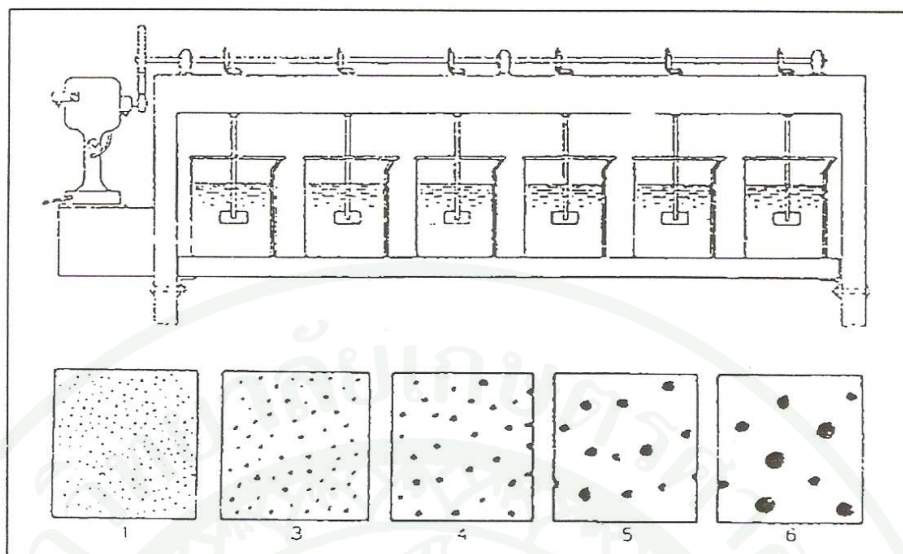
ตกตะกอนได้ ปัจจัยสำคัญที่ใช้ออกแบบเครื่องมือในการกวนช้าคือ ความเร็วแรงแฉกที่เช่นเดียวกับการออกแบบการกวนเร็ว แต่แตกต่างกันที่กระบวนการรวมตะกอนต้องการความเร็วที่ไม่เร็วจนเกินไปจนทำให้กลุ่มตะกอนแตก

Grutsch and Mallatt (1977) ศึกษาพบว่า หากใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณน้อยเกินไป อาจไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ในทางกลับกันหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะนำไปสู่การกลับคืนสู่การมีเสถียรภาพอีกครั้งของประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ หมายถึง ปริมาณที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์

การควบคุมกระบวนการสร้างและรวมตะกอนให้เกิดได้ดีที่สุดสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น โดยวิธีจาร์เทสต์ (Jar Test) โดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) การควบคุมโดยวิเคราะห์หาสารสร้างตะกอนที่เหลือ (Residual Coagulant Analysis) และการควบคุมโดยการหาความสามารถในการกรอง (Filterability) เป็นต้น การตรวจเอกสารนี้จะระบุเฉพาะการควบคุมโดยวิธีจาร์เทสต์

การควบคุมโดยวิธีจาร์เทสต์

การควบคุมกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยวิธีจาร์เทสต์ เป็นวิธีที่นิยมกันมากและใช้กันมานาน เป็นวิธีทดสอบในบีกเกอร์ (Beaker) เครื่องมือทดสอบเป็นเครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการเลือกชนิดของสารเคมี (สารที่ใช้ในการสร้างตะกอน) และกำหนดสถานะต่างๆของน้ำ ซึ่งได้แก่ ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ ความเร็วรอบ ระยะเวลากวนน้ำ (ทั้งกวนเร็วและกวนช้า) และระยะเวลาตกตะกอน จากนั้นจึงทำการทดลองโดยสารเคมีในปริมาณต่างๆกันลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ระดับ pH อาจรักษาให้คงที่และแปรเปลี่ยนได้ ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์การทดลอง ผลที่ได้จากการทำจาร์เทสต์ คือ ปริมาณของสารสร้างตะกอนและระดับ pH ที่เหมาะสมต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน



ภาพที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำจาร์ทดสอบ

ที่มา : อุดรและจารุรัตน์ (2537)

Cleasby (1990) พบว่าควรใช้อัตราการกววนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 0.5-1.0 นาที แล้วตามด้วยการกววนช้า 25-35 รอบ/นาที นาน 20 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

กรรณิการ์ (2525) แนะนำให้ใช้อัตราการกววนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 1 นาที จากนั้นลดลงเหลือ 30-40 รอบ/นาที นาน 20 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 1 ชั่วโมง

เสริมพลและไชยยุทธ (2525) แนะนำให้ใช้อัตราการกววนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 3 นาที แล้วตามด้วยการกววนช้า

ระบบผลิตน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

กระบวนการผลิตน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร มีกำลังผลิต 150 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการผลิตดังต่อไปนี้ เริ่มจากการสูบน้ำจากแหล่งน้ำซึ่งได้มาจากการส่งน้ำจากเขื่อนน้ำอูนมายังอ่างเก็บน้ำสกลนคร เมื่อน้ำที่สูบมาจากอ่างสกลนครผ่านท่อผสมน้ำดิบไปยังถังแบ่งน้ำดิบ ต่อมาเข้าถังกวนช้าเพื่อให้ตะกอนได้เริ่มจับตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่ถังตกตะกอน ขั้นต่อไปให้น้ำไหลผ่านระบบกรองซึ่งทำให้น้ำมีความใสสะอาดยิ่งขึ้น แต่ก็ยังมีเชื้อโรคต่างๆอาศัยอยู่ในน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการผสมคลอรีนลงไปในการฆ่าเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำเรียกว่า Disinfection โดยใช้น้ำใสที่มีขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร หลังจากนั้นใช้เครื่องสูบน้ำแรงดันสูงสูบน้ำเก็บไว้ยังหอถังสูง เพื่อเพิ่มความดันก่อนที่จะเข้าระบบการจ่ายน้ำประปาต่อไป

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร มีรายละเอียดดังนี้

1. ถังกวนเร็ว

เมื่อน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงซึ่งสูบมาจากอ่างสกลนครจะเข้าสู่กระบวนการแรก โดยการจ่ายสารโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ลงในท่อน้ำดิบ เมื่อน้ำดิบไหลด้วยความเร็วผ่านภายในท่อนี้ลักษณะเป็นเกลียวจะสร้างความปั่นป่วนทางกลศาสตร์ เพื่อให้สารโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI หรือ PAC) ผสมกับน้ำได้อย่างทั่วถึง โดยจุดประสงค์ของการใส่ PAC เพื่อสร้างตะกอน

2. ถังกวนช้า

หลังจากน้ำดิบผสมกับ PAC อย่างดีแล้วในระบบกวนเร็ว ระบบจะค่อยๆลดความปั่นป่วนทางกลศาสตร์ลงในถังกวนช้า เพื่อให้ตะกอนได้มีโอกาสจับตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยถังกวนช้าจะมีลักษณะเป็นแผ่นกั้นขวางสลับกันโดยที่น้ำจะไหลตามช่องในแนวนอนเรียกถังระบบนี้ว่า

Mixing basin with around-the-end baffle

3. ถังตกตะกอน

เมื่อตะกอนจับตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นในถังกวนช้าแล้วจากนั้นน้ำจะไหลผ่านผนังกระจายน้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น โดยมีรูกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่นมายังถังตกตะกอน เพื่อให้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากแยกตัวออกจากน้ำตกลงสู่ก้นถัง ซึ่งมีลักษณะเป็นกรวยสี่เหลี่ยม โดยกรวยจะทำหน้าที่รวบรวมตะกอนที่ตกลงมาเพื่อทิ้งออกจากระบบ ส่วนตะกอนที่มีขนาดเล็กที่ยังไม่อาจตกลงสู่ก้นถังได้ก็จะไหลผ่านเข้ารางรับน้ำใสเพื่อเข้าระบบกรองน้ำต่อไป

4. ถังกรอง

เมื่อตะกอนที่มีขนาดเล็กที่ยังไม่สามารถตกตะกอนได้ในถังตกตะกอนจะไหลเข้ามายังถังกรองซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะแยกตะกอนออกจากน้ำโดยตะกอนจะถูกกรองโดยชั้นกรวดกรองรวม 5 ชั้น ซึ่งกรวดแต่ละชั้นมีลักษณะดังนี้ ชั้นแรก กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-3 มม. ชั้นที่ 2 กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-6 มม. ชั้นที่ 3 กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-12.5 มม. ชั้นที่ 4 กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.-20 มม. ชั้นที่ 5 กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-38 มม. ซึ่งกรวดแต่ละชั้นทำหน้าที่กรองตะกอนที่เหลือจากการตะกอนจากถังตกตะกอน โดยน้ำจะวิ่งไหลผ่านชั้นกรองชั้นต่างๆ โดยตะกอนจะไปติดค้างอยู่ตามชั้นกรองหรือแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำที่ไหลผ่านมาจากถังตกตะกอน ซึ่งได้ผ่านกระบวนการ Coagulation-Flocculation แล้ว น้ำที่ผ่านระบบกรองน้ำแล้วจะมีน้ำใสมาเก็บจากตะกอนแขวนลอยต่างๆมีค่าความขุ่นต่ำ และมีพอลิเมอร์น้ำใสที่ผ่านกระบวนการกรอง

5. การฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

การฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา ซึ่งนับว่าเป็นกระบวนการสุดท้ายในส่วนของ การผลิตน้ำประปา คือภายหลังจากกระบวนการกรองน้ำเสร็จสิ้นแล้ว น้ำที่ได้จะยังมีเชื้อโรค จุลินทรีย์ หลงเหลือปะปนอยู่จึงจำเป็นต้องนำน้ำมาผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรค โดยส่วนมากจะใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา ซึ่งในระบบการผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ใช้วิธีการผสมคลอรีนในขั้นตอนก่อนการกวนเร็ว และ หลังกระบวนการกรองน้ำ ก่อนที่จะนำไปเก็บถังเก็บน้ำใสต่อไป

6. ระบบจ่ายน้ำ

หลังจากน้ำใสที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคแล้ว น้ำใสจะถูกเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำใส ขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นน้ำใสจะถูกสูบด้วยเครื่องสูบน้ำแรงดันสูงนำไปเก็บไว้ยังหอถัง มีขนาดความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงจากระดับพื้นดิน 39.5 เมตร เพื่อเพิ่มแรงดัน ก่อนที่จะถูกส่งไปสู่อาคารต่างๆภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

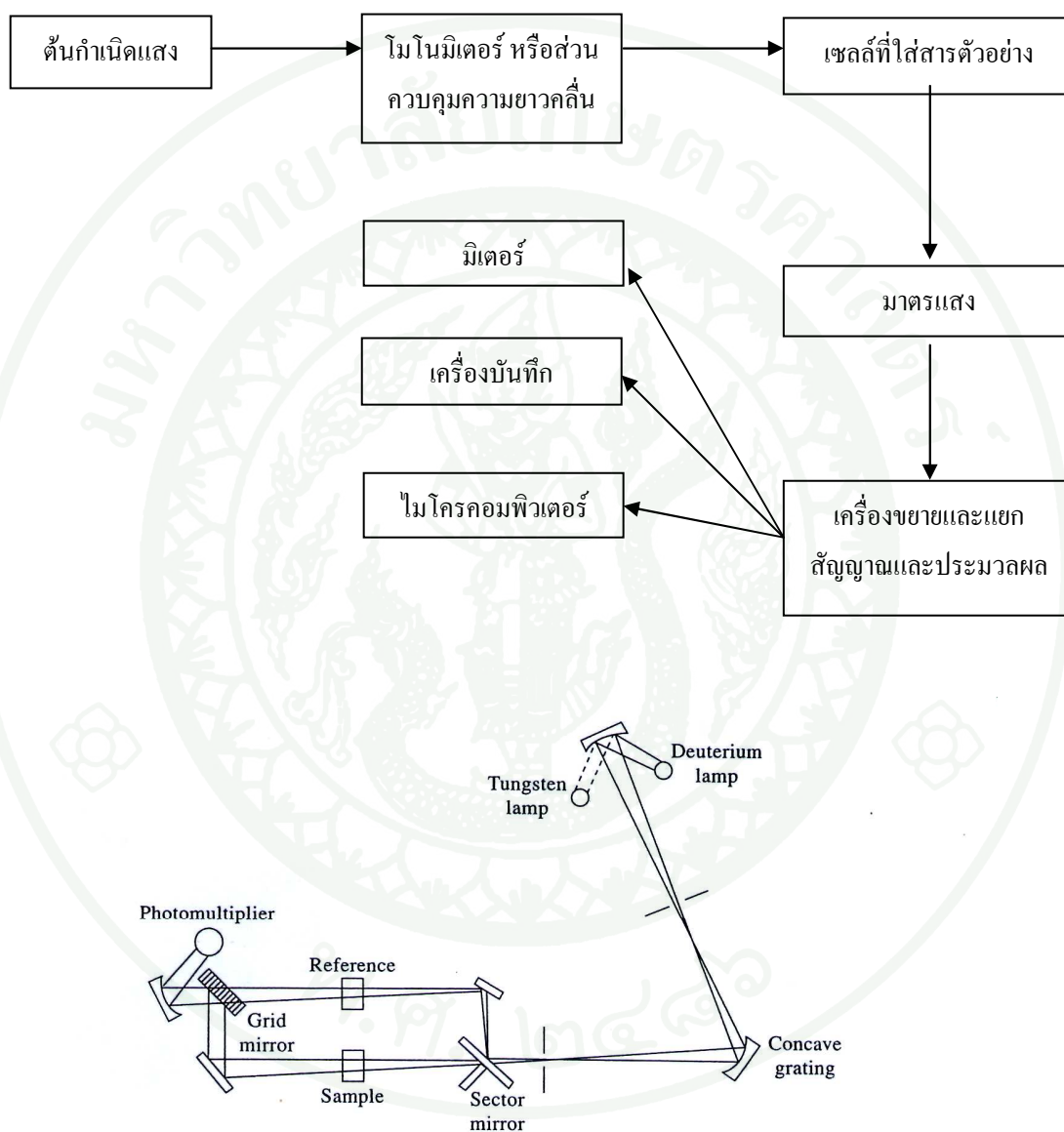
หลักการทางสเปกโทรโฟโตเมทรี

การวัดการดูดกลืนคลื่นแสงและการปล่อยคลื่นแสงจะใช้เครื่องมือวัดสมบัติทางแสง หรือที่เรียกว่าเครื่องมือที่ใช้ในสเปกโตรสโกปี ซึ่งมีหลายชนิดและมีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่การจัดวางส่วนประกอบพื้นฐานต่างกัน (นิพนธ์, 2547) ส่วนประกอบที่เหมือนกันประกอบด้วย

1. แหล่งคลื่นแสงที่มีพลังงานคงที่
2. อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นที่ทำหน้าที่แยกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ จากคลื่นแสงที่ไม่เป็นเอกรงค์ (polychromatic radiation) ให้เป็นคลื่นแสงเอกรงค์ (monochromatic radiation) เรียกว่า โมโนโครเมเตอร์
3. ภาชนะโปร่งแสงสำหรับใส่สารที่จะวิเคราะห์
4. เครื่องวัดความเข้มของคลื่นแสงหรือทรานสดิวเซอร์ ใช้เปลี่ยนสัญญาณคลื่นแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า
5. ส่วนที่แปลงสัญญาณ (signal processor) จะรับสัญญาณจากตัววัดสัญญาณ แล้วขยายให้อยู่ในรูปดิจิทัลหรืออานาลอก

6. ระบบอ่านสัญญาณเพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำค่านั้นไปใช้ได้

เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 6



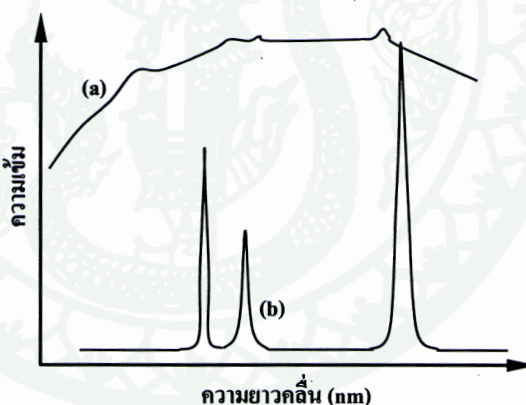
ภาพที่ 6 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ที่มา : แม้น (2552)

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

แหล่งกำเนิดแสงที่ดีควรให้แสงที่มีความเข้มสม่ำเสมอ และมีความคงที่ตลอดความยาวคลื่นที่ใช้งาน เพื่อให้ได้แสงที่มีความเข้มเพียงพอต่อการตรวจวัด ต้องมีแหล่งจ่ายไฟที่มีกำลังคงที่เพื่อให้พลังงานแก่แหล่งกำเนิดแสง แหล่งกำเนิดแสงทางสเปกโทรสโกปีมี 2 ประเภท คือ

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงออกมามีลักษณะเป็นเส้นสเปกตรัม (lines source) หรือแสงแบบเส้นที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งเฉพาะ
2. แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงออกมาเป็นแถบของคลื่นที่ต่อเนื่องเป็นช่วงคลื่นกว้างๆ (continuum source) โดยความเข้มของคลื่นแสงที่ให้ออกมาจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ขึ้นกับความยาวคลื่น



ภาพที่ 7 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (a) สเปกตรัมของคลื่นแสงแบบต่อเนื่อง (b) สเปกตรัมของคลื่นแสงแบบเส้น

ที่มา : นิพนธ์ (2547)

ตารางที่ 5 แหล่งกำเนิดคลื่นที่ให้ออกมาเป็นแถบของคลื่นที่ต่อเนื่องกับเป็นช่วงคลื่นกว้างๆ

แหล่งกำเนิดคลื่นแสง	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	ใช้กับเทคนิคสเปกโทรสโกปี
Xenon arc lamp	250-600	Molecular florescence
H ₂ and D ₂ lamps	160-380	UV molecular absorption
Tungsten/halogen lamp	240-2500	UV/visible/near-IR molecular absorption
Tungsten lamp	350-2200	Visible/near-IR molecular absorption
Nernst glower	400-20,000	IR molecular absorption
Nichrome wire	750-20,000	IR molecular absorption
Globar	1200-40,000	IR molecular absorption

ที่มา : นิพนธ์ (2547)

2. อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น

ทำหน้าที่แยกแสงที่ประกอบด้วยหลายคลื่นที่ต่อเนื่องกันจากแหล่งกำเนิดออกเป็นคลื่นเดี่ยวหรือออกเป็นส่วนประกอบของคลื่นที่มีช่วงแคบๆ (เป็นแถบแคบๆที่มีความคมชัด) ปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ ฟิลเตอร์ (filters) และ โมโนโครเมเตอร์ (monochromators)

ฟิลเตอร์ (Filters)

ฟิลเตอร์ทำมาจากสารที่ยอมให้คลื่นแสงผ่านออกมาในช่วงความยาวคลื่นจำเพาะ และสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆได้ ฟิลเตอร์ที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ชนิดดูดกลืน (absorption filter) และอินเทอร์เฟรนซ์ฟิวเตอร์ (interference filter)

Absorption filter อาจทำด้วยแก้วหรือพลาสติกสีต่างๆ ซึ่งดูดกลืนคลื่นแสงไว้บางคลื่นแล้วปล่อยคลื่นที่มีช่วงแคบๆ ออกมาตามสีของฟิลเตอร์ที่ใช้ เช่น ฟิลเตอร์สีเขียวจะปล่อยคลื่นแสงสีเขียว (500-560 nm) ออกมา

Interference filter หรือไดอิเล็กทริกฟิวเตอร์ (dielectric filter) หรือ Fabry-Perot filter เป็นฟิลเตอร์ที่ฉาบด้วยสารที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำและเป็นสารไดอิเล็กทริก (เป็นสารที่โปร่งแสง

บางส่วนและสะท้อนแสงได้บางส่วน) เช่น MgF_2 , CaF_2 หรือ SiO_2 เป็นชั้นบางๆบนแผ่นแก้วแล้ว ฉาบทับด้วยเงินบางๆ แล้วประกบด้วยแผ่นแก้วอีกชั้นหนึ่ง

3. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromators)

โมโนโครมาเตอร์จัดเป็นเครื่องแยกคลื่นแสงที่ให้ความกว้างของฟลักที่แคบกว่าการใช้ฟิลเตอร์ กล่าวคือจะได้คลื่นแสงที่แยกออกมาจากโมโนโครมาเตอร์มีความบริสุทธิ์กว่าจากฟิลเตอร์ และคลื่นต่างๆที่ได้จากโมโนโครมาเตอร์จะมีความยาวคลื่นค่าหนึ่งเฉพาะ

4. เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง

ภาชนะสำหรับบรรจุสารตัวอย่างสำหรับการดูดกลืนคลื่นแสง เรียกว่า absorption cell หรือ cuvette ต้องทำด้วยสารที่โปร่งแสงกับแสงในช่วงคลื่นที่ศึกษา และไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง และจะต้องให้มีการสะท้อนกลับหรือให้การสูญเสียความเข้มของแสงน้อยที่สุด (นิพนธ์, 2547)

เซลล์แก้วและเซลล์ควอทซ์หรือฟอสซิลิกา จะใช้ในช่วงความยาวคลื่น 340–2500 nm ซึ่งเป็นช่วงวิสิเบิล และ 180–2500 nm ในช่วงอัลตราไวโอเลต โดยที่เซลล์แก้วจะดูดกลืนคลื่นแสงช่วงอัลตราไวโอเลต ทั้งเซลล์แก้วและควอทซ์หรือฟอสซิลิกาจะไม่นำมาใช้ในการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด เนื่องจากสามารถดูดกลืนช่วงอินฟราเรดได้

ช่องใส่เซลล์ตัวอย่งนั้นปกติจะออกแบบให้มีฝาครอบ หรือเลื่อนปิดอย่างมิดชิด เพื่อไม่ให้แสงจากภายนอกตกไปที่ตัววัดสัญญาณ การทำความสะอาดเซลล์ควรล้างให้สะอาดอยู่เสมอ อย่าให้มีรอยขีดข่วน เพราะจะทำให้แสงที่มากกระทบเกิดการสะท้อนได้

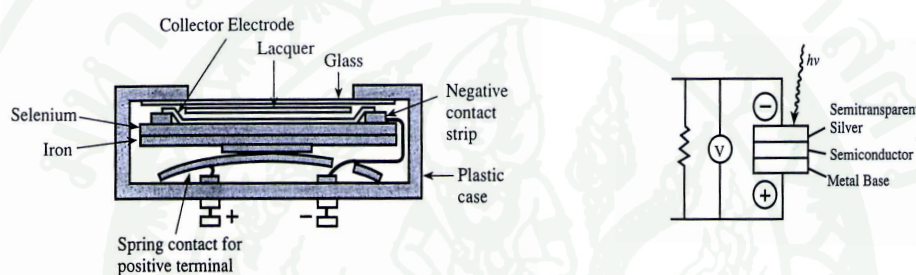
5. เครื่องวัดแสงหรือตัววัดสัญญาณ

โดยทั่วไปจะเปลี่ยนสัญญาณคลื่นแสง (radiation energy) ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (electrical signal) โดยใช้ตัวทรานสดิวเซอร์ (transducer) เป็นตัวเปลี่ยน (นิพนธ์, 2547) เครื่องที่ใช้สำหรับวัดแสงนั้นมีหลายแบบแตกต่างกันที่ความกว้างของช่วงคลื่นแสงที่สามารถตรวจสอบได้ ความเร็วของการตอบสนอง สภาพไวของการรับแสง เป็นต้น (แม้น, 2552)

เครื่องวัดแสงที่ใช้กันปัจจุบัน มีดังต่อไปนี้

5.1 โฟโตโวลตาอิกเซลล์ หรือแบรีเออร์-เลเยอร์เซลล์ (photovoltaic or barrier-layer cells)

เป็นเซลล์ที่ใช้ตรวจและวัดแสงที่อยู่ในช่วงวิสิเบิล และให้สภาวะไวสูงสุดที่ความยาวคลื่น 55 nm แต่ประสิทธิภาพจะลดลงประมาณ 10% ที่ความยาวคลื่น 350 และ 750 nm ลักษณะของตัววัดนี้แสดงดังภาพที่ โฟโตเซลล์อีกอย่างหนึ่งเป็นซิลิกอนโฟโตเซลล์ (silicon photocell) ซึ่งเหมาะที่จะใช้วัดแสงในช่วงวิสิเบิล และช่วงอินฟราเรด



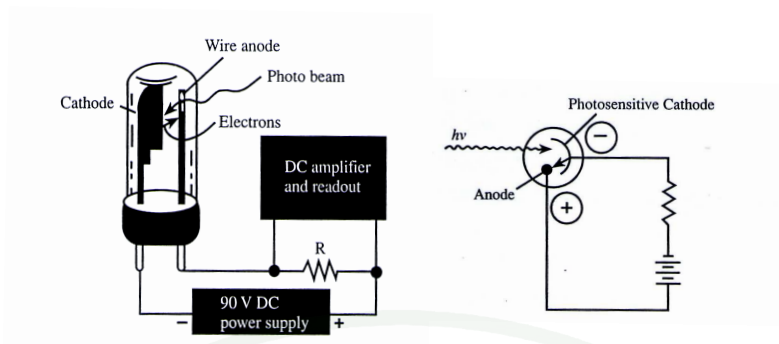
ภาพที่ 8 ลักษณะของแบรีเออร์-เลเยอร์เซลล์ หรือโฟโตโวลตาอิกเซลล์

ที่มา : แม้น (2552)

5.2 หลอดรับแสง (phototube)

เป็นหลอดที่ทำด้วยแก้วซิลิกา ภายในหลอดเป็นสุญญากาศหรือเกือบเป็นสุญญากาศ มีแคโทด (cathode) ฉาบด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกแสง (photoemissive material) แคโทดมักจะทำเป็นรูปครึ่งวงกลม ดังภาพที่ 5

เมื่อแสงตกกระทบกับสารที่ฉาบผิวแคโทดจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้น แล้ววิ่งไปขั้วแอโนดที่ต่อกับศักย์ไฟฟ้าคงที่ประมาณ 90 โวลต์ ซึ่งอยู่ในช่วงของ saturated current กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น โดยไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าแม้จะเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยก็ไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

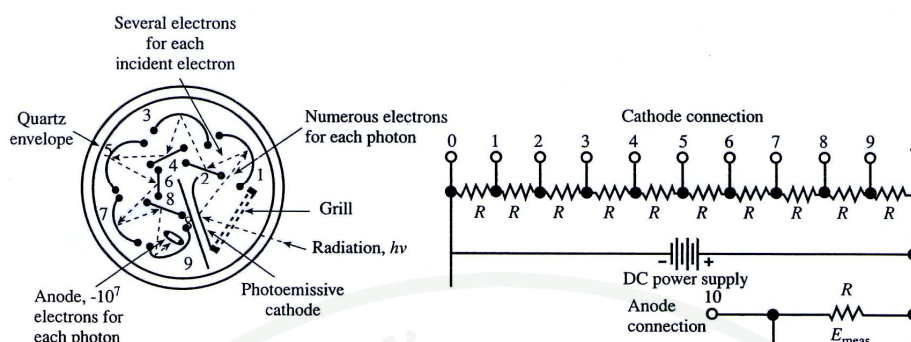


ภาพที่ 9 หลอดรับแสงและวงจรไฟฟ้า

ที่มา : แม้น (2552)

5.3 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier = PMT)

มีลักษณะคล้ายกับหลอดรับแสง แต่ PMT มีสภาพไวกว่าและสามารถใช้งานในช่วงความยาวคลื่น 190-900 nm ดังนั้น PMT จึงนิยมใช้ในการทำมาตรวัดแสงในเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ลักษณะของหลอด PMT แสดงตามภาพที่ ภายในหลอดประกอบด้วยแคโทดจำนวน 9 ชุด เรียกว่า ไดโนด (dynodes) แต่ละไดโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 90 โวลต์ เรื่อยไปจนครบ 9 ไดโนดนั้นคือปริมาณของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้น $10^6 - 10^7$ เท่า ศักย์ไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับแอโนดจะต่างกัน 900 โวลต์ หลอด PMT เหมาะกับการวัดแสงที่มีกำลังต่ำ แต่ถ้าวัดแสงที่มีกำลังสูงๆ หลอดจะเสื่อมเร็ว เพราะส่วนที่ไวต่อแสงเสีย (แม้น, 2552)



ภาพที่ 10 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (PMT) (a) ภาพตัดขวางลักษณะหลอด (b) วงจรไฟฟ้า

ที่มา : แม้น (2552)

5.4 ตัววัดสัญญาณ โฟโตคอนดักติวิตี (Photoconductivity detector)

Photoconductive detector เป็นอุปกรณ์วัดแสงที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ การทำงานใช้หลักการที่ว่าเมื่อแสงที่มีความเข้มขึ้นพอเหมาะมาตกกระทบบจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม สารกึ่งตัวนำ จะทำให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานของสารกึ่งตัวนำลดลง บางครั้งจะเรียกว่า photoresistive sensors (พิพนธ์, 2547)

ตัวต้านทานไวแสงหรือแอลดีอาร์ (LDR, Light Dependent Resistor) ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์วัดแสงชนิด photoconduction light sensors ตัวต้านทานไวแสงนี้จะแปรค่าได้กับแสง เมื่อให้พลังงานที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดโฮล (hole) และอิเล็กตรอนขึ้นจำนวนมากมาย พลังงานที่จะทำให้เกิดโฮลและอิเล็กตรอนนี้จะต้องเป็นพลังงานที่มาจากภายนอก เช่น แสง ความร้อน

แอลดีอาร์ส่วนใหญ่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำจำพวกแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) หรือแคดเมียมซีเลไนด์ (CdSe) ตอบสนองแสงได้ดีในช่วงวิสิเบิล และเลดซัลไฟด์ (PbS) หรือเลดซีเลไนด์ (PbSe) จะตอบสนองได้ดีในช่วงอินฟราเรด

ข้อดีในการใช้งานแอลดีอาร์ คือ วัตต์ต่อแสง ขนาดเล็ก มีการเปลี่ยนแปลงค่าได้กว้าง ข้อเสีย คือ มีผลตอบสนองต่อความถี่ของแสงแคบ และเนื่องจากต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกต่อแอลดีอาร์ จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวแอลดีอาร์ ทำให้สารกึ่งตัวนำเสื่อมคุณภาพเร็ว

5.5 ตัววัดสัญญาณซิลิคอนไดโอด (silicon diode detector)

เป็นอุปกรณ์ไวแสงชนิดหนึ่งประกอบด้วยการรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) บน silicon chip เมื่อผ่านความต่างศักย์ค่าหนึ่งให้กับรอยต่อพี-เอ็น เรียกว่า ทำ forward bias condition หรือไบแอสตรง แต่เมื่อมีการผ่านความต่างศักย์จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อ ในสภาวะนี้ตรงรอยต่อจะเรียกว่าไบแอสกลับ (reverse bias condition) ทำให้เกิดช่องของความพร่อง (depletion layer) ที่ลดการนำไฟฟ้าของรอยต่อจนเกือบเป็นศูนย์เมื่อให้คลื่นแสงตกกระทบที่ silicon chip จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮล (hole) เกิดขึ้นในช่องว่างของความพร่อง ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเป็นปรากฏโดยตรงกับกำลังของคลื่นแสงที่ได้รับ ตัววัดสัญญาณนี้จะตอบสนองในช่วงความยาวคลื่น 190-1100 nm

6. เครื่องขยาย-แยกสัญญาณและประมวลผล (Signal Processors and Data Read Out)

สัญญาณที่ได้จากเครื่องจะนำเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ขยายสัญญาณให้มากขึ้น หรืออาจเปลี่ยนสัญญาณจาก D.C. เป็น A.C. หรือ A.C. เป็น D.C. อาจมีการกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป หรือนำสัญญาณที่ได้ไปแยกเข้าเครื่องอินทิเกรชัน หรือเปลี่ยนให้เป็น log scale เป็นต้น (แม้น, 2552)

การกระเจิงแสงของอนุภาค

ความขุ่น (Turbid) หมายถึง น้ำที่มีพวกรบกวนซึ่งกีดขวางทางเดินของแสงที่ผ่านน้ำนั้น ความขุ่นของน้ำเกิดจากการที่น้ำมีสารพวก คอลลอยด์ อินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร และสิ่งมีชีวิตเล็กๆ สารพวกนี้จะทำให้เกิดการกระจัดกระจาย (scattered) และการดูดกลืน (absorbed) ของแสงแทนที่จะผ่านไปเป็นเส้นตรง (กรรณกาน์, 2544) ความขุ่นที่สร้างปัญหาให้โรงผลิตน้ำประปา มักเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) มีขนาดระหว่าง 10^{-6} มิลลิเมตร (1 nm) ถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (1 μm) ความขุ่นของน้ำอาจจะวัดได้ 2 วิธี คือ วัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านความขุ่น (light transmission) หรือวัดปริมาณแสงที่สะท้อนจากอนุภาคหรือการกระเจิง

แสง (light scattering) โดยที่อนุภาคในน้ำจะกระเจิงแสงได้นั้น มีเงื่อนไขว่าอนุภาคต้องมีการหักเหของแสง (refractive index, m) แตกต่างจากน้ำ (Gregory., 1997)

การกระเจิงแสงเกิดจากปฏิกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ซึ่งอนุภาคเกิดการเหวี่ยงโดยการแกว่งเป็นผลมาจากการแผ่รังสีไฟฟ้าชั้นที่ 2 เมื่อผ่านคลื่นแสงเอกรงค์ที่มีความยาวคลื่น λ ไปยังตัวกลางที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาด $\frac{3}{2}\lambda$ จะทำให้อนุภาคเกิดการกระเจิงแสงออกมาทุกทิศทาง การกระเจิงแสงที่เกิดจากการที่อนุภาคดูดกลืนคลื่นแสงแล้วปล่อยพลังงานออกมา โดยที่พลังงานไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า การกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การกระเจิงแสงแบบเรย์ลีย์ (Reyleigh Scattering) หรือการกระเจิงแสงของอนุภาคขนาดเล็ก และการกระเจิงแสงของอนุภาคขนาดใหญ่ ทฤษฎีของการกระเจิงแสงถูกเผยแพร่ก่อนทศวรรษที่ 20 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี นั่นคือ Mie theory การกระเจิงแสงนำไปสู่การกระจายมุมของแสงและการลดลงของความเข้มแสงที่ผ่านออกไป ซึ่งปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวัดความขุ่น โดยที่ความขุ่นสามารถวัดได้ทั้งแสงที่ทะลุผ่าน หรือแสงที่ถูกกระเจิงไปในมุมต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสง (Gregory., 1997)

ตัวอย่างเครื่องวัดความขุ่น

หลักการวัดความขุ่น อาจจะเป็นอีกกรณีพิเศษของการวัดสี แทนที่จะวัดการสะท้อนแสง ความลึกเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการกั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ที่มีขอบเขตที่แน่นอนที่ใช้ในการตัดสินใจ หลักการที่ใช้เป็นมาตรฐานคือ Jackson Turbidimeter ในการตรวจหาซัลเฟอร์ในการล้างระเบิด (bomb washings) หรือในน้ำตัวอย่าง หรือใช้ในการตรวจหาความขุ่นของน้ำ บางทีเรียกว่า Tyndallometry

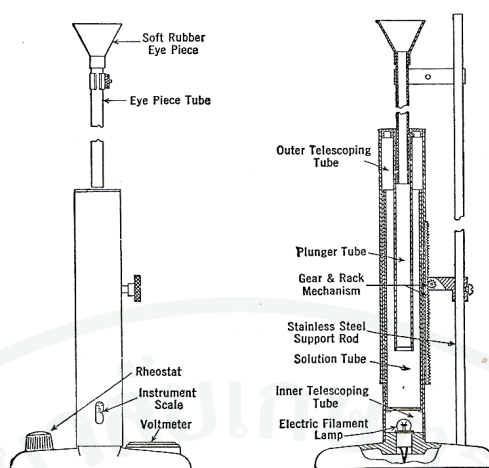
Jackson Turbidimeter แสดงดังภาพที่ 11 อาจทำงานด้วยเทียนหรือหลอดไฟที่ให้แสงคล้ายเทียน สารละลายหรือสารตัวอย่างจะถูกวางในกระบอกจนกระทั่งไม่เห็นเปลวไฟเหนือหลอดไฟ ความลึกของสารละลายในขณะนั้นจะเท่ากับค่าความขุ่นของสารละลาย



ภาพที่ 11 Jackson Turbidimeter (Fisher Scientific Co.)

ที่มา : Snell and Snall (1948)

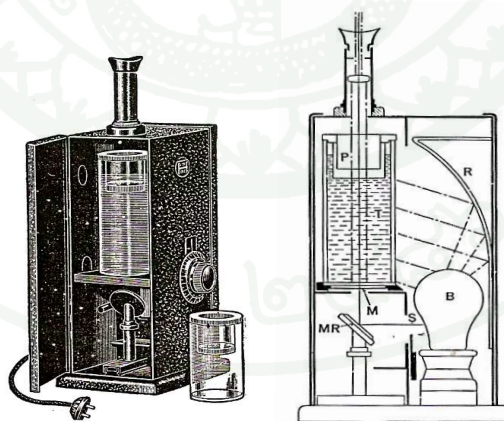
Burgess-Parr turbidimeter เป็นเครื่องมือที่ค่อนข้างซับซ้อนขึ้นแสดงดังภาพที่ 12 เครื่องมือจะมีภาชนะบรรจุตัวอย่าง และใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง การทำงานเริ่มจากเทสารตัวอย่างลงในเครื่องวัดความขุ่น และใส่กระบอกลูกสูบลงไป ใส่ช่องมอง (eyepiece tube) และที่กั้นแสงในตำแหน่ง ปรับอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ฐานจนกระทั่งอ่านได้ 3 โวลต์ ซึ่งแสดงบนโวลต์มิเตอร์ ปรับความลึกของหลอดโดยรางฟันเฟืองและเกียร์จนกระทั่งไม่เห็นไส้หลอดไฟ ในอดีตวิธีการนี้เป็นวิธีที่สะดวกมาก การอ่านค่าความขุ่นอ่านได้จากความลึกได้โดยตรง ตามที่มีการปรับเปลี่ยนหลอดที่ตั้งอยู่กับที่ขนาด 13 มม. โดยวางลงที่จุดเดิมเป็นหลอดยางแข็งที่มีปลายหลอดทำด้วยกระจก ในลักษณะเดียวกันนี้หลอดถูกแทนที่ด้วยขนาด 8 มม. โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะใช้น้ำตัวอย่างเพียง 25 มล. โดยใช้วัดน้ำตัวอย่างที่มีซัลเฟอร์อยู่ 0.7 ถึง 1.3 มก.



ภาพที่ 12 Burgess-Parr turbidimeter

ที่มา : Snell and Snall (1948)

Betz-Hellige Turbidimeter แสดงได้ตามภาพที่ 13 แสงที่ถูกสร้างด้วยมนุษย์จะสะท้อนกลับสู่หลอดและสังเกตผลการทดลองที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้แสงสีเหลือง B จะส่องไปยังสารละลายที่บรรจุอยู่ในหลอด T, บางส่วนสะท้อนจาก R หรือจากกระจกสะท้อน MR สามารถปรับสไลด์ S เพื่อควบคุมแสงที่สะท้อนจากกระจก MR จนกระทั่งสมดุลกับแสงที่สะท้อนจาก R ลูกสูบแก้ว P เป็นตัวมาตรฐานในการวัดความลึก เครื่องวัดความขุ่นนี้สามารถอ่านค่าความขุ่นได้ถึง 150 ppm

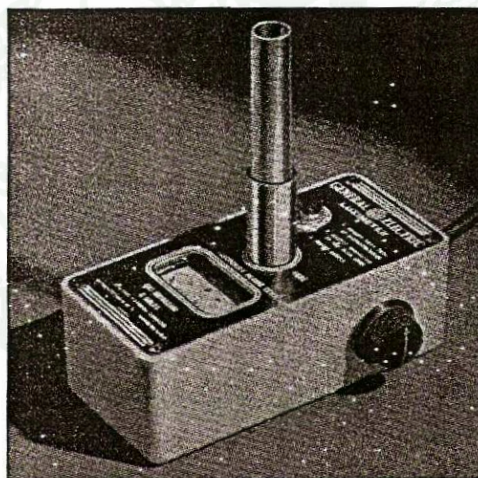


ภาพที่ 13 Betz-Hellige turbidimeter and diagrammatic view

ที่มา : Snell and Snall (1948)

General Electric Luximeter แสดงตามภาพที่ 14 เริ่มแรกพัฒนาเพื่อตรวจหาสีฟ้าที่อยู่ใน การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตสำหรับฆ่าเชื้อโรคในนม ได้ประยุกต์เครื่องนี้ในการวัดแสงที่ผ่าน สารละลายที่มีความขุ่น ตัวอย่างที่ใช้ในการวัดค่าความขุ่นคือ สารละลายน้ำตาล (sugar syrups) ช่วง 100-3500 ppm วัดในหน่วยของซิลิกา (silica scale)

เครื่องมือประกอบด้วยหลอดไฟขนาด 6 โวลต์ โดยใช้เซลล์แบบแห้ง (dry cell) ใช้แบตเตอรี่แบบเปียก (wet battery) หรือมีตัวเปลี่ยนค่าคงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็น 110 โวลต์ ค่ากระแส 60 รอบ ไม่มีตัวกรองแสง (filters) แสงผ่านสารตัวอย่างตกกระทบกับโฟโตเซลล์ (photocell) และทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าวัดได้โดยใช้ไมโครแอมมิเตอร์ (microammeter) อ่านค่าการส่องผ่าน (Transmission) ได้จากเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านออกมาคล้ายกับสารละลายที่เป็นตัวควบคุม ดังนั้นค่าที่อ่าน ได้คือเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน ในการวัดการส่องผ่านของสารละลายที่มีสีต้องทำการกรองสี สารละลายออกไปก่อน เพื่อเป็นการชดเชยสีในสารละลายที่ใช้เป็นมาตรฐาน ลดผลที่เกิดจากสีของ สารตัวอย่างขณะทำการวัด



ภาพที่ 14 General Electric Luximeter

ที่มา : Snell and Snall (1948)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. การวิเคราะห์น้ำดิบ และการหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม

- 1.1 อุปกรณ์เครื่องแก้วสำหรับทำจาร์เทสต์
- 1.2 เครื่องวัดความขุ่น (turbidity meter) รุ่น 2100 AN บริษัท HACH
- 1.3 เครื่องชั่งละเอียด รุ่น 240A Precisa
- 1.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น Cyberscan 510 PC
- 1.5 ชุดกรองอากาศ
- 1.6 เครื่องดูดอากาศ (vacuum pump)
- 1.7 กระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมโครเมตร
- 1.8 ตู้อบความร้อน (drying oven)
- 1.9 เดสิคเคเตอร์ (desicator)
- 1.10 ถ้วยกระเบื้อง
- 1.11 เครื่องอ่างไอน้ำ (water bath)
- 1.12 อุปกรณ์เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

2. เครื่องวัดความขุ่นของน้ำ

- 2.1 หลอดไฟ LED สีแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร และ หลอดไส้ ขนาด 6
โวลต์
- 2.2 แผ่นกรองแสงทำจากอะคริลิก ขนาด กว้าง × ยาว × หนา = $4.0 \times 6.0 \times 0.3$
เซนติเมตร
- 2.3 หลอดตัวอย่างทำจากแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร
(รวมฝาขวด)
- 2.4 ตัวต้านทานไวแสง (LDR) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร

- 2.5 ตัวต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม
- 2.6 โวลต์มิเตอร์
- 2.7 ถ่านไฟฉายขนาด 1.5 โวลต์ 12 ก้อน และ 9 โวลต์ 2 ก้อน
- 2.8 ชุดทดลองสำเร็จรูปเพื่อแปลงไฟ DC
- 2.9 สายไฟ และรางถ่าน
- 2.10 กล่องพาสติกสีดำด้าน

วิธีการ

1. การหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำประปา กรณีศึกษาโรงผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

1.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบของอ่างสกลนคร

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบพารามิเตอร์ต่างๆ ใช้ตามวิธีมาตรฐาน Standard Method 18th edition 1992 for The examination of Water and Wastewater ดังแสดงตามตารางที่ 7

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ และวิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. พีเอช	pH meter
2. ความขุ่น	Turbidimeter
3. ของแข็งแขวนลอย	2540 D. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C
4. ของแข็งละลายในน้ำ	2340 C. Total Dissolved Solids Dried at 180°C
5. ความกระด้างของน้ำ	2340 C. Hardness (EDTA Titrimetric Method)
6. สภาพด่าง	2320 B. Alkalinity (Titration Method)

1.2 การศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ ของระบบผลิตน้ำประปา ได้แก่ ค่าความปั่นป่วนของน้ำ (Velocity Gradient, G) และระยะเวลากักเก็บน้ำ (Detention Time, t)

1.2.1 ศึกษาเอกสารการออกแบบโรงผลิตน้ำประปา ของวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร รวมทั้งอัตราการเติมสารสร้างตะกอน (PACI)

1.2.2 คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบทั้งการกวนเร็ว และ กวนช้า (การกวนช้าแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน)

1.2.3 นำค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของระบบผลิตน้ำประปา มากำหนด ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ในการทดลองโดยวิธีจาร์เทสต์

1.3 การหา Optimum Dose (ปริมาณสารเคมีที่สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด)

1.3.1 เตรียมน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา พร้อมทั้งวัดความขุ่นเริ่มต้น

1.3.2 ทำ Jar Test เพื่อหา Optimum Dose

1.3.3 เติมสารสร้างตะกอน (PACI) โดยนำข้อมูลจากข้อ 1.2 ทำการกวนเร็ว และ กวนช้าตามข้อมูลที่ได้

1.3.4 สังเกตลักษณะตะกอน ตั้งให้ตกตะกอนเป็นระยะเวลา 30 นาที และวัดค่าความ ขุ่นสุดท้าย

1.3.5 เปลี่ยนปริมาณสารสร้างตะกอน เพื่อหา Optimum Dose อีกครั้ง

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์

กระบวนการ	ความปั่นป่วนของน้ำ (G, s ⁻¹)	ความเร็วรอบในการ กวน (n, rpm)	ระยะเวลาการกวน (t, min)
กวนเร็ว	2,426	100	1
กวนช้า stage 1	40	14	14
กวนช้า stage 2	24	10	14
กวนช้า stage 3	11	6	14
ตกตะกอน	-	0	30

2. อุปกรณ์วัดความขุ่นอย่างง่าย

2.1 ศึกษาหลักการวัดความขุ่น และประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นอย่างง่าย

2.1.1 ศึกษาหลักการของเครื่องวัดความขุ่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.1.2 ออกแบบเครื่องวัดความขุ่น

2.1.3 ศึกษาและเลือกชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง, เซลล์ตัวอย่าง (sample cell) ตัวรับสัญญาณ และตัวแสดงผล

2.1.4 ประกอบอุปกรณ์ต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้

2.1.5 ทำการทดลองโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

2.1.6 นำผลการทดลองมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นน้ำดิบและความต่างศักย์ไฟฟ้า

2.2 การประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่น

การประดิษฐ์มีส่วนประกอบพื้นฐาน และการจัดเรียงส่วนประกอบเหมือนกับเครื่องมือวัดทางสเปกโทรสโกปี ตามภาพที่ 6 รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

2.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

อ้างอิง The International Organization for Standardization (1990), ISO 7027 Section 3 กำหนดว่าการวัดการกระเจิงแสงของอนุภาคควรวัดในช่วงใกล้อินฟราเรด (near-IR; λ 860 nm) เนื่องจากที่ $\lambda > 800$ nm สามารถลดสิ่งรบกวนที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีสี (Honngve D. and Åkesson, 1998) ในการประดิษฐ์ใช้ไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode หรือ LED) ซึ่งสามารถเปล่งแสงออกมาได้คลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่อง การประดิษฐ์ใช้หลอด LED ที่ให้แสงสีแดง มีความยาวคลื่น 607-617 นาโนเมตร และหลอดอีกประเภทหนึ่งใช้หลอดไส้ หรือ tungsten lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง ช่วง 240-2500 นาโนเมตร

2.2.2 อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น

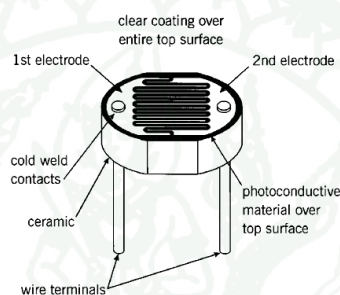
เลือกใช้ฟิลเตอร์สีแดงซึ่งทำมาจากอาคิลิก โดยฟิลเตอร์จะปล่อยคลื่นแสงออกมาตามสีของฟิลเตอร์ ดังนั้นฟิลเตอร์สีแดง จะกรองแสงจากหลอดไส้ แล้วปล่อยให้แสงที่มีความยาวคลื่นช่วง 617-780 นาโนเมตรออกมา ในช่วงคลื่นนี้ถือว่าอยู่ในช่วง shortwave near-IR ($\lambda = 750-1100$ nm)

2.2.3 ภาชนะใส่สารตัวอย่าง

เลือกใช้หลอดกลมที่ทำจากแก้ว ซึ่งแก้วจะดูดกลืนแสงในช่วงยูวี ($\lambda = 180-220$ nm) ในช่วงคลื่นนี้ไม่มีผลต่อการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถใช้ภาชนะใส่ตัวอย่างที่ทำจากแก้วได้

2.2.4 อุปกรณ์วัดความเข้มแสง

ตัววัดความเข้มแสงที่ใช้คือ ตัวต้านทานไวแสงหรือแอลดีอาร์ (LDR, Light Dependent Resistor) มีลักษณะตามภาพที่ 15 การทำงานคือ เมื่อแสงมาก ความต้านทานจะต่ำ แต่เมื่อแสงน้อยความต้านทานจะสูง การใช้งานควรต่อ LDR กับตัวต้านทานอื่น เพราะถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่าน LDR มากเกินไปจะทำให้เสียหายได้ การวัดกระแสหรือความต่างศักย์ต้องวัดค่าที่คล่อมตัวต้านทานแทน ดังนั้น ถ้าแสงมาก ความต้านทาน LDR ต่ำ กระแสหรือความต่างศักย์ที่วัดได้ก็จะมาก แต่ถ้าแสงน้อย ความต้านทานของ LDR สูง กระแสหรือความต่างศักย์ที่วัดได้ก็จะต่ำ

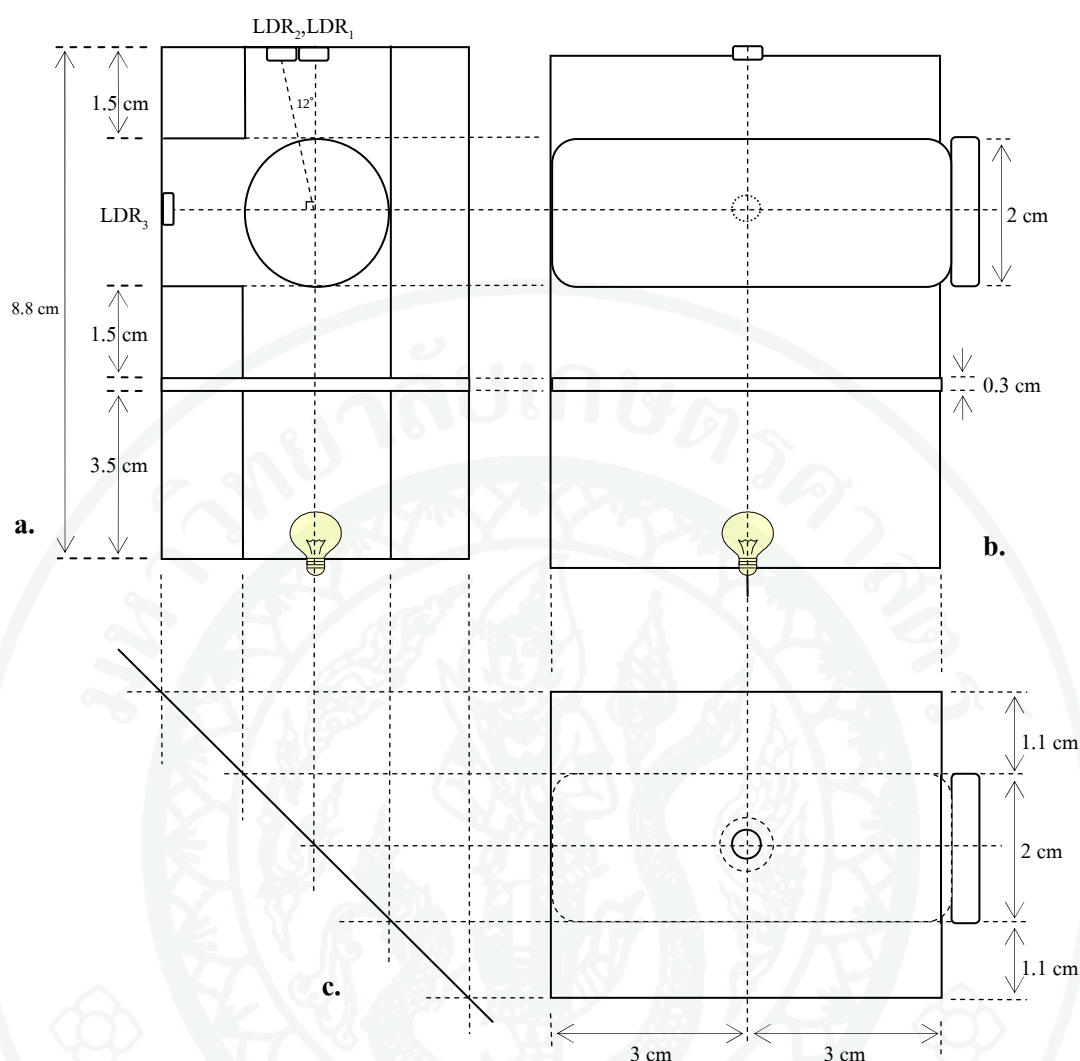


ภาพที่ 15 ลักษณะของตัวต้านทานไวแสง

ที่มา : www.oknation.net/blog/ec/2008/01

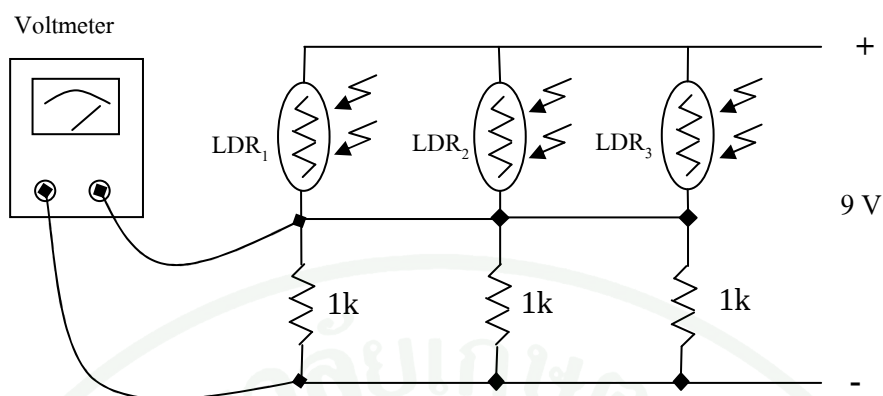
2.2.5 เครื่องขยายและแยกสัญญาณและประมวลผล

เมื่อแสงกระเจิงผ่านน้ำตัวอย่าง มาถึง LDR ในส่วนนี้สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า จะถูกแปลงผลออกมาในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งวัดได้โดยโวลต์มิเตอร์



ภาพที่ 16 โครงสร้างของเครื่องวัดความขุ่น a. top view, b. side view และ c. front view

จากภาพที่ 16 จะเห็นว่ามี LDR อยู่ 3 ตำแหน่ง นั่นคือ 0° , 12° และ 90° กับแนวของหลอดตัวอย่าง ที่วางเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการศึกษาของ H.H. Kleizen และคณะ ซึ่งอ้างอิงถึง Primary scattering ของ Mie theory กล่าวว่าการกระเจิงแสงส่วนมากแล้วจะกระเจิงในทิศทางไปข้างหน้ามุมระหว่าง $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ความเข้มของแสงที่กระเจิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมลดลง ดังนั้นการกระเจิงแสงไปข้างหน้า (forward scattering) จะให้ความเข้มของแสงมากกว่าการกระเจิงไปด้านข้าง (sideways scattering) โดยทำการศึกษามุม 12° และ 90° พบว่ามุม 12° ให้ความเข้มแสงมากกว่า 90° จากแบบกำหนดระยะหลอดไฟห่างจาก LDR ที่ระยะ 8.8 เซนติเมตร เนื่องจากที่ระยะนี้แสงจากหลอดไฟตกกระทบกับ LDR เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่มีความเข้มแสงสูงสุด



ภาพที่ 17 การต่อวงจร LDR

ผลและวิจารณ์

1. รายการคำนวณระบบผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

1.1 อัตราไหล่ที่ใช้ในการออกแบบ (Design Flow)

$$\begin{aligned} \text{กำลังผลิตที่ต้องการ (Plant Capacity)} &= 150 && \text{ลบ.ม./ชม.} \\ &= 0.042 && \text{ลบ.ม./วท.} \end{aligned}$$

1.2 ท่อผสมเร็ว (Static Mixer)

ท่อผสมเร็ว จำนวน 1 ชุด (PWA Static Mixer)

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 250 มม.} &= 0.25 && \text{ม.} \\ \text{พื้นที่หน้าตัดท่อ} &A = \frac{\pi d^2}{4} && (1) \\ &= \frac{\pi \times (0.25 \text{ m})^2}{4} \\ &= 0.049 && \text{m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดท่อผสมเร็วเท่ากับ 0.049 ตารางเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อผสมเร็ว} &V = \frac{Q}{A} && (2) \\ &= \frac{150 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.049 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \times 60 \text{ sec}} \\ &= 0.8571 && \text{m/sec} \\ &\sim 0.9 && \text{m/sec} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเร็วของน้ำดิบที่ไหลผ่านท่อผสมเร็วมีค่าเท่ากับ 0.9 เมตรต่อวินาที

$$\text{ปริมาตรของท่อผสมเร็ว} \quad V = AL \quad (3)$$

จากทฤษฎี กำหนดการออกแบบความยาวของท่อผสมเร็ว ต้องยาวเท่ากับ 1.5 – 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Kawamura, 1976)

ท่อผสมเร็วที่ใช้ในระบบประกอบด้วย 3 Element เท่ากับ 3 Stage

ความยาวของท่อผสมเร็วแบบ PWA Static Mixer คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\text{Static Mixer Length} &= 1.5 \times \text{Diameter (m)} \times 3 (\text{element}) - \text{Diameter (m)} \\ &= [1.5 \times (0.25 \text{ m}) \times 3] - 0.25 \text{ m} \\ &= 0.875 \text{ m}\end{aligned}$$

ตามทฤษฎีความยาวของท่อผสมเร็วควรมีความยาวอยู่ในช่วง 0.875 – 1.625 ม.

ในระบบจริงออกแบบความยาวของท่อผสมเร็วเท่ากับ 1.125 ม.

$$\begin{aligned}\text{จะได้ ปริมาตรของท่อผสมเร็ว } V = AL &= 0.049 \text{ m}^2 \times 1.125 \text{ m} \\ &= 0.055125 \text{ m}^3\end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาตรของท่อผสมเร็วมีค่าเท่ากับ 0.055125 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}\text{เวลากักเก็บน้ำในท่อผสมเร็ว } t = \frac{V}{Q} &= \frac{0.055125 \text{ m}^3}{0.042 \text{ m}^3/\text{s}} \\ &= 1.3125 \text{ sec} \\ &\sim 1.3 \text{ วท.}\end{aligned}$$

ดังนั้น เวลากักเก็บน้ำในท่อผสมเร็วมีค่าเท่ากับ 1.3 วินาที (ข้อกำหนด 1 – 3 วินาที, Kawamura, 1976)

การคำนวณหาความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient)

$$\text{จากสมการ } G = \sqrt{\frac{hf g}{vt}} \quad (4)$$

เมื่อ G = ความเร็วเกรเดียนท์ หรือความปั่นป่วนของน้ำ (mps/m, s⁻¹)

hf = ค่าสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ (m)

g = อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s²)

ν = ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity ที่ 25°C = $0.8975 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

t = เวลากักเก็บน้ำ (sec)

จากความเร็วน้ำผ่านท่อผสมนำไปหาค่าสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (head loss) จาก PWA

Graph จะได้ว่า ที่ความเร็ว 0.9 ม./วท. ค่า Head loss Across Static Mixer เท่ากับ 0.7 ม.

(ข้อกำหนด 0.6 – 0.9 ม., Kawamura)

$$\text{แทนค่าในสมการ จะได้ } G = \sqrt{\frac{0.7 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{(0.8975 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}) \times 1.3 \text{ s}}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2,426 \text{ วท.}^{-1} \\
 G \times t &= 2,426 \times 1.3 \\
 &= 3,153.8
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเร็วเกรเดียนต์ของการกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 2,426 วท.⁻¹ และเวลากักเก็บน้ำมีค่าเท่ากับ 1.3 วท.

1.3 ถังผสมช้า

ถังผสมช้าแบบ Baffled Channel 2 บ่อ

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการไหลในแต่ละบ่อ} &= 75 \text{ ลบ.ม./ชม.} \\
 &= 0.02083 \text{ ลบ.ม./วท.} \\
 \text{ปริมาตรของแต่ละบ่อ} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{ลึก} \\
 &= 5.60 \times 6.55 \times 1.70 \\
 &= 62.4 \text{ ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

ถังกวนช้าแบ่งเป็น 3 Stages

Stage 1;

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรน้ำ} &= [(\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{ลึก}) \times \text{จำนวนช่อง}] + [(\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{ลึก}) \times \text{จำนวนช่องเปิด}] \\
 &= [(0.85 \times 0.85 \times 1.70) \times 14] + [(0.04 \times 0.10 \times 1.70) \times 14] \\
 &= 17.1955 + 0.0952 \\
 &= 17.2907 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาตรน้ำใน Stage ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 17.2907 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}
 \text{เวลากักเก็บน้ำ จากสมการ } t &= \frac{V}{Q} = \frac{17.2907 \text{ m}^3}{0.02083 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \\
 &= 830 \text{ sec} \\
 &= 13.83 \text{ min} \\
 &\sim 14 \text{ min}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น เวลากักเก็บน้ำใน Stage ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 14 นาที

หาค่าความเร็วเกรเดียนต์ (Velocity Gradient), G

จากสมการ
$$G = \sqrt{\frac{hf g}{\nu t}}$$

เมื่อ G = ความเร็วเกรเดียนต์ หรือความปั่นป่วนของน้ำ (mps/m, s⁻¹)

hf = ผลต่างระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละ Stage (m)

g = อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s²)

ν = ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity ที่ 25°C = $0.8975 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

t = เวลาที่กักเก็บน้ำ (sec)

แทนค่าในสมการ เมื่อ ค่า hf ของ Stage 1 มีค่าเท่ากับ 12.5 ซม. หรือเท่ากับ 12.5×10^{-2} ม.

จะได้
$$G = \sqrt{\frac{(12.5 \times 10^{-2} \text{ m}) \times (9.81 \text{ m/s}^2)}{(0.8975 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}) \times (14 \times 60 \text{ sec.})}}$$

$$= 40.33 \text{ s}^{-1}$$

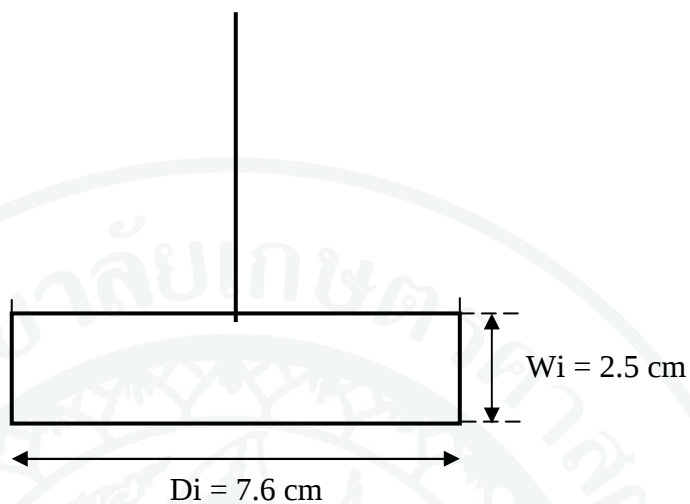
ดังนั้น ใน Stage ที่ 1 มีค่าความเร็วเกรเดียนต์เท่ากับ 40 วท.⁻¹ และเวลาที่กักเก็บน้ำเท่ากับ 14 นาที

หมายเหตุ ค่า V , G , และ t ใน Stage 2 และ 3 คำนวณเหมือน Stage ที่ 1 ได้ค่าตามตารางที่

ตารางที่ 8 ค่าการคำนวณพารามิเตอร์ของการกวนช้าแบบ Baffled Channel

Stage	$V \text{ (m}^3\text{)}$	$hf \times 10^{-2} \text{ (m)}$	$G \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$t \text{ (min)}$
1	17.2907	12.5	40	14
2	17.3621	4.5	24	14
3	17.6953	1.0	11	14

2. การคำนวณความเร็วรอบของเครื่องจารีเทสต์



จากสมการการหาความเร็วแกรเดียนท์

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} \quad (5)$$

เมื่อ G = ความเร็วแกรเดียนท์ หรือความปั่นป่วนของน้ำ (mps/m, s^{-1})

W = พลังงานที่ใช้ในการกวนผสม (N.m./s.m^3)

μ = ค่าความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ (at 25°C $\mu = 0.0008949 \text{ N.s./m}^2$)

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (6)$$

เมื่อ P = พลังงานที่ใช้ในการกวน (N.m./s)

V = ปริมาตรของน้ำในถัง (m^3)

ค่าความเร็วแกรเดียนท์สำหรับถังกวนช้าแบบ Baffle

$$G = \sqrt{\frac{\gamma h_L}{\mu T}} \quad (7)$$

เมื่อ γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ; $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V}$

h_L = พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการไหล (m)

T = เวลาเก็บกักของน้ำในถัง (เวลากวน) (sec)

2.1 การกวนเร็ว (Rapid Mixing)

2.1.1 หาพลังงานที่ใช้กวนน้ำ

จากสมการ $P = WV$ (8)

$$W = G^2 \mu \quad (9)$$

กำหนดค่า G ของการกวนเร็ว = 2,426 วท.^{-1}

ที่ 25 °C $\mu = 0.0008949 \text{ N.s/m}^2$

แทนค่าในสมการที่ (2) จะได้
$$W = (2,426 \text{ s}^{-1})^2 \times 0.0008949 \text{ N.s/m}^2 \times \frac{\text{m}}{\text{m}} = 5,267 \text{ N.m/s.m}^3$$

แทนค่า W ในสมการที่ (1)

เมื่อปริมาตรน้ำ (V) ที่ใช้ในการทดลอง = 500 มล. ($= 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$)

จะได้
$$\begin{aligned} P &= 5,267 \text{ N.m/s.m}^3 \times (5 \times 10^{-5} \text{ m}^3) \\ &= 0.26335 \text{ N.m/s} \\ &= 0.26335 \text{ J/s} \\ &= 0.26335 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้น พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำสำหรับการกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 0.26335 W

2.1.2 การหาความเร็วรอบของใบพัด

สมมุติว่าการกวนเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

จากสมการ $P = K_T n^3 D_i^5 \rho$ (10)

เมื่อ P = พลังงานที่ใช้ในการกวน, N.m/s

K_T = ค่าคงที่ของใบพัด

n = ความเร็วรอบของใบพัด, rps

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, m

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, Kg/cm^3

กำหนดค่า $K_T = 2.25$

$$\rho = 0.99707 \text{ g/cm}^3 \text{ (ที่ } 25^\circ \text{C)}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} n &= \sqrt[3]{\frac{P}{K_T D_i^5 \rho}} \\ n &= \sqrt[3]{\frac{0.1742 \text{ N.m/s}}{1.69 \times (7.6 \times 10^{-2} \text{ m})^5 \times 997.07 \text{ kg/m}^3}} \\ &= 3.95 \text{ rps} \\ &= 237 \text{ rpm} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเร็วรอบของใบพัดในการกวนเร็วมีค่าเท่ากับ 237 รอบต่อนาที

2.1.3 เชื่ค่า Reynode number, N_{RE}

$$\text{จากสมการ} \quad N_{RE} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu} \quad (11)$$

- เมื่อ
- N_{RE} = Reynode number
 - D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (m)
 - n = ความเร็วรอบของใบพัด (rps)
 - ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (Kg/m^3)
 - μ = ค่าความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ (N.s/m^2)

แทนค่าในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} N_{RE} &= \frac{(7.6 \times 10^{-2} \text{ m})^2 \times 3.95 \text{ rps} \times 997.07 \text{ Kg/m}^3}{0.0008949 \text{ N.s/m}^2} \\ &= 25,420 \end{aligned}$$

ดังนั้น จากการคำนวณค่า N_{RE} เท่ากับ 25,420 >> 10,000 แสดงว่าอยู่ในช่วงการกวนแบบปั่นป่วน

2.2 การกวนช้า (Slow Mixing)

ค่าที่สนใจสำหรับการกวนช้าคือ GT

2.2.1 ค่า GT ของแต่ละ Stage

ตารางที่ 9 ค่า GT แต่ละ Stage ของการกวนช้าแบบ Baffled Channel

Stage	G (s ⁻¹)	T (sec)	GT
1	40	840	33,600
2	24	840	20,160
3	14	840	9,240

2.2.2 การหาพลังงานที่ใช้ในการกวน, P

จากสมการ
จะได้

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = G^2 \mu V$$

เมื่อ P = พลังงานที่ใช้ในการกวนผสม (W)
 G = ความเร็วเกรเดียนต์ หรือความปั่นป่วนของน้ำ (mps/m, s⁻¹)
 μ = ค่าความหนืดพลศาสตร์ของน้ำ (at 25 °C $\mu = 0.0008949$ N.s./m²)
 V = ปริมาตรของน้ำในถัง (m³)

Stage 1 ; G = 40 s⁻¹

จากสมการ

$$P = G^2 \mu V$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 P &= (40 \text{ s}^{-1})^2 \times 0.0008949 \frac{\text{N.s.}}{\text{m}^2} \times 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \\
 &= 7.159 \times 10^{-5} \text{ N.m/s} \\
 &= 7.159 \times 10^{-5} \text{ J/s} \\
 &= 7.159 \times 10^{-5} \text{ W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ที่ Stage 1 ต้องใช้พลังงานในการกวนผสมเท่ากับ $7.159 \times 10^{-5} \text{ W}$

หมายเหตุ ที่ Stage 2 และ 3 จำนวนเหมือน Stage 1 นั่นคือ Stage 2 ใช้พลังงานในการกวนผสมเท่ากับ $2.587 \times 10^{-5} \text{ W}$ และ Stage 3 เท่ากับ $5.414 \times 10^{-6} \text{ W}$

2.2.3 การหาความเร็วรอบของจาร์เทสต์ (n, rpm)

สมมติว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

$$\text{จากสมการ} \quad P = K_T n^3 D_i^5 \rho$$

เมื่อ P = พลังงานที่ใช้ในการกวน, N.m/s

K_T = ค่าคงที่ของใบพัด

n = ความเร็วรอบของใบพัด, rps

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, m

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, Kg/cm³

$$\text{จะได้ว่า} \quad n = \sqrt[3]{\frac{P}{K_T D_i^5 \rho}} \quad (12)$$

Stage 1 ; $P = 7.159 \times 10^{-5}$ N.m/s

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสมการจะได้} \quad n &= \sqrt[3]{\frac{7.159 \times 10^{-5} \text{ N.m/s}}{2.25 \times (7.6 \times 10^{-2} \text{ m})^5 \times 999.07 \text{ kg/m}^3}} \\ &= 0.2324 \text{ rps} \\ &= 13.94 \text{ rpm} \\ &\approx 14 \text{ rpm} \end{aligned}$$

ใช้ค่า Reynolds number, N_{RE}

$$N_{RE} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าจะได้} \quad N_{RE} &= \frac{(7.6 \times 10^{-2} \text{ m})^2 \times 0.2324 \text{ rps} \times 999.07 \text{ kg/m}^3}{0.0008949 \text{ N.s/m}^2} \\ &= 1,498.60 \ll 10,000 \end{aligned}$$

ดังนั้น จากการคำนวณไม่ได้อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน แต่กรณีของการไหลแบบราบเรียบค่า N_{RE} อยู่ในช่วงน้อยกว่า 10-20 แสดงว่าการไหลที่คำนวณได้นั้นอยู่ในช่วงเปลี่ยนแปลงการไหล และความเร็วรอบที่ใช้ในการกวนซ้ำของ Stage 1 คือ 14 รอบต่อนาที
หมายเหตุ ที่ Stage 2 และ 3 จำนวนเหมือน Stage 1 จะได้ความเร็วรอบเท่ากับ 10 รอบต่อนาที และ 6 รอบต่อนาที และค่า N_{RE} เท่ากับ 1,067.85 และ 633.87 ตามลำดับ

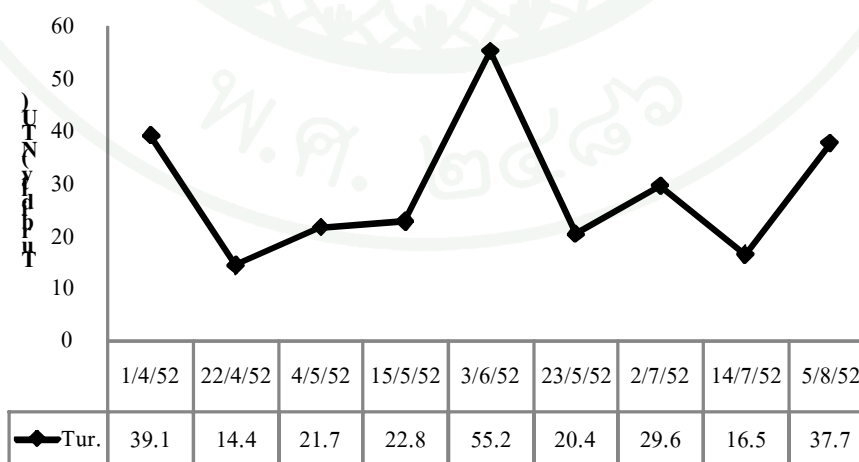
ตารางที่ 10 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองจาร์เทสต์ของกระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการ	G (s ⁻¹)	T (sec)	GT	P (W)	n (rpm)
กวนเร็ว	2,426	1.3	3,153.80	0.26335	237
กวนช้า					
Stage 1	40	840	33,600	7.159×10^{-5}	14
Stage 2	24	840	20,160	2.587×10^{-5}	10
Stage 3	11	840	9,240	5.414×10^{-6}	6

3. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบของอ่างสกลนคร

3.1 การวิเคราะห์ค่าความขุ่นของน้ำดิบ (Turbidity)

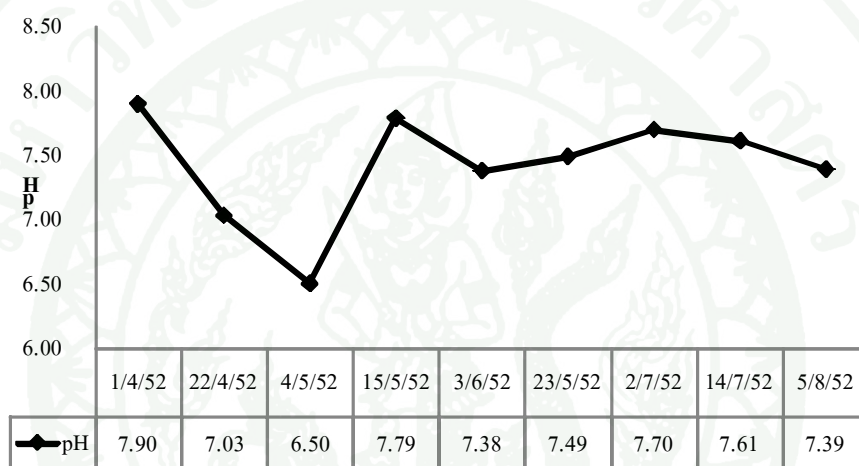
จากการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้งต่อเดือน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพที่ 18 จากกราฟจะเห็นว่าค่าความขุ่นของน้ำโดยเฉลี่ยแล้วจะอยู่ในช่วง 10-40 NTU แต่ในช่วงวันที่ 3 มิถุนายน 2552 ค่าความขุ่นของน้ำอยู่ที่ 55.2 NTU เนื่องมาจากเกิดฝนตกหนักก่อนทำการเก็บตัวอย่างน้ำ น้ำฝนได้ชะล้างตะกอนดินที่อยู่บนฝั่งลงมาสู่แอ่งน้ำ ส่งผลให้ความขุ่นของน้ำมากกว่าปกติ



ภาพที่ 18 ค่าความขุ่นน้ำดิบ

3.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH)

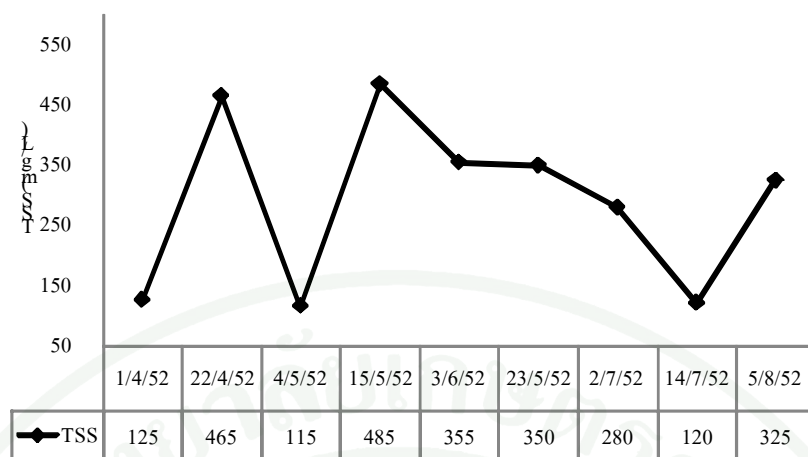
ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดิบ แสดงได้ตามภาพที่ 19 จากกราฟจะเห็นว่าค่า pH ของน้ำดิบส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าเป็นกลาง (pH เท่ากับ 7) ตามมาตรฐานที่กำหนด ถือได้ว่าอยู่ในการใช้ประโยชน์ประเภทที่ 1 คือแหล่งน้ำที่มีคุณภาพน้ำตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภท



ภาพที่ 19 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ (Total Suspended Solids : TSS)

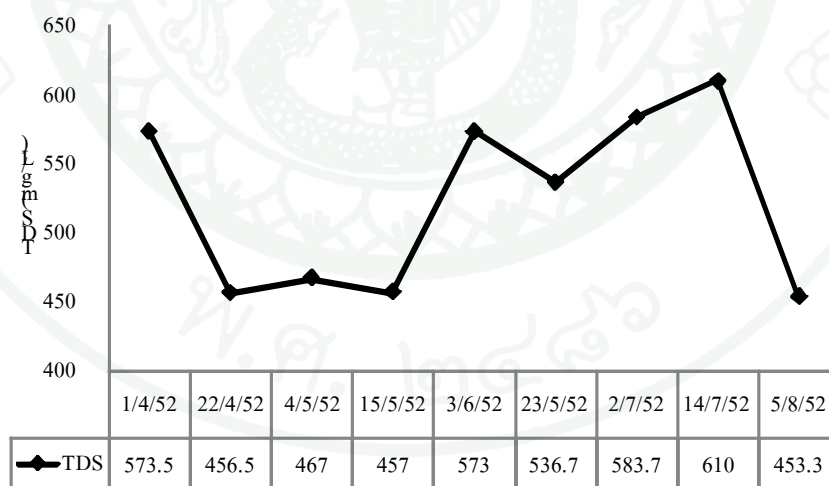
ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพที่ 20 จะเห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 100-500 มก./ล. ซึ่งค่า TSS นี้เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สำหรับในระบบประปานั้นไม่นิยมวัด จะใช้ค่าความขุ่นเป็นตัวแสดงควมใสหรือไม่ใสของน้ำมากกว่า



ภาพที่ 20 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids : TDS)

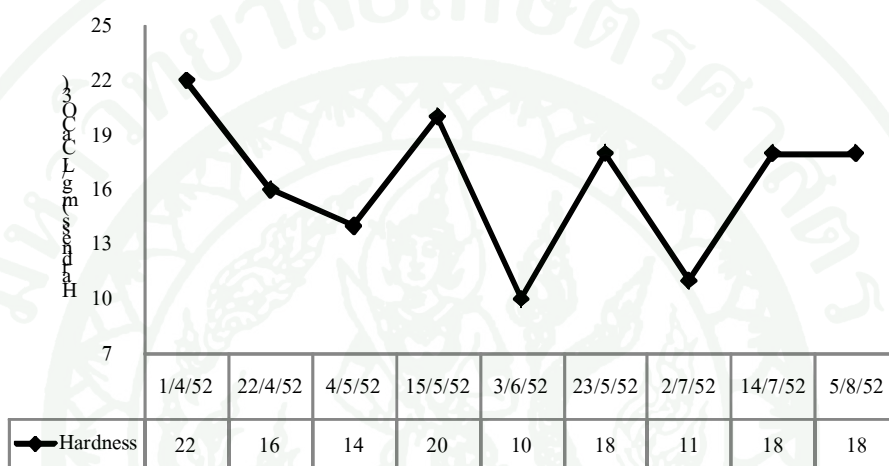
ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพที่ 21 จากกราฟปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำจะอยู่ในช่วง 450-610 มก./ล.



ภาพที่ 21 ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ

3.5 การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำ (Hardness)

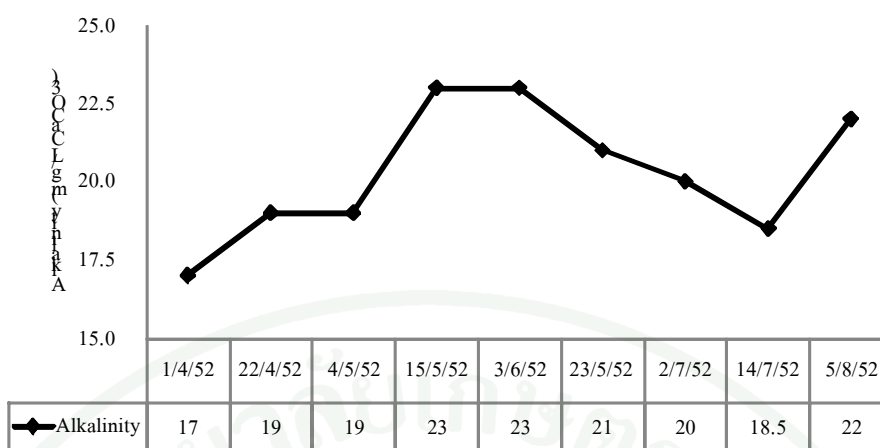
ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพที่ 22 จากกราฟจะเห็นได้ว่าความกระด้างของน้ำจะอยู่ในช่วง 10-25 มก./ล. ของ CaCO_3 แสดงว่าน้ำดิบของอ่างน้ำในวิทยาเขตสกลนคร จัดเป็นประเภทน้ำอ่อน โดยที่น้ำอ่อนอาจมีแนวโน้มทำให้เกิดโรคหัวใจ มีความสามารถในการกักกรองสูง และสามารถละลายสารอันตรายต่างๆจากท่อและเครื่องสุขภัณฑ์ต่างๆ



ภาพที่ 22 ความกระด้างของน้ำดิบ

3.6 การวิเคราะห์สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ผลการวิเคราะห์แสดงได้ตามภาพที่ 23 จากกราฟจะเห็นได้ว่าสภาพความเป็นด่างของน้ำดิบอยู่ในช่วง 17-23 มก./ล. ของ CaCO_3 ในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการเกิด Coagulation ได้ดี น้ำดิบควรมีสภาพความเป็นด่างอย่างน้อย 30 มก./ล. ของ CaCO_3 ดังนั้นควรมีการเติมสารเคมี เช่น Ca(OH)_2 , CaCO_3 ฯลฯ เพื่อปรับสภาพความเป็นด่างของน้ำก่อนเข้าระบบผลิตน้ำประปา เป็นการประหยัดสารสร้างตะกอนที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาได้อีกทางหนึ่ง

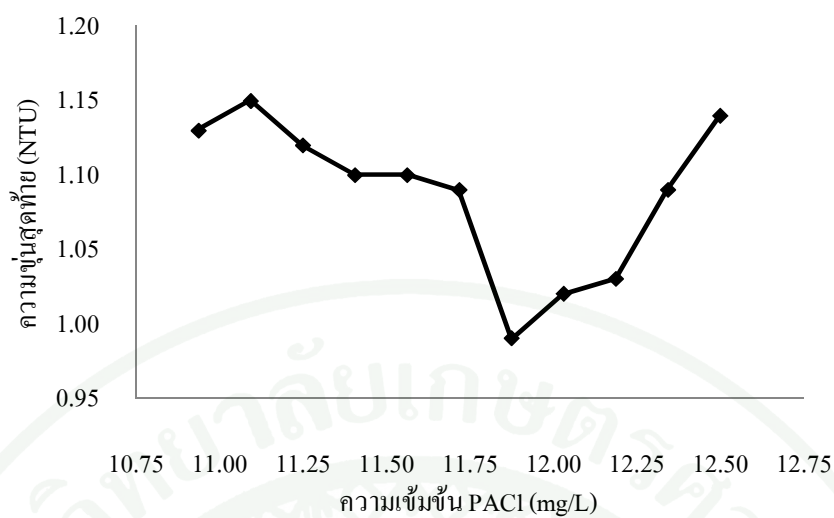


ภาพที่ 23 สภาพความเป็นด่างของน้ำดิบ

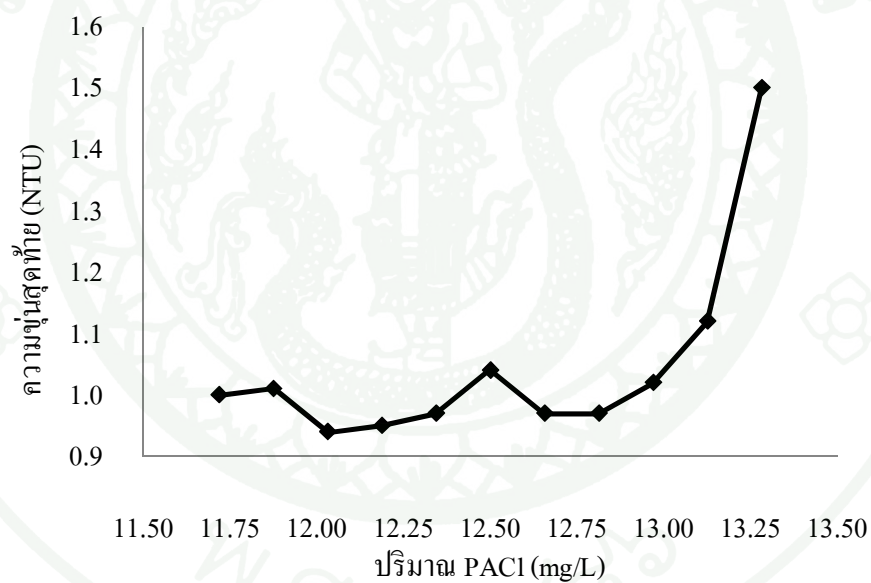
การวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบของอ่างสกลนครในพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO), ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Demand, BOD) และไนเตรท (Nitrate) สามารถหาข้อมูลได้จากปริญญานิพนธ์เรื่อง การเฝ้าระวังคุณภาพน้ำในอ่างสกลนคร ปีการศึกษา 2550 ของนายวิญญ์ อินทรมะดัน, นางสาวอิสรารวรรณ ลั่นทมเหลือ และนางสาวอริศรา สุวรรณทา คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

4. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับระดับความขุ่นของน้ำดิบ จากการทดลองโดยวิธีจาร์เทสต์

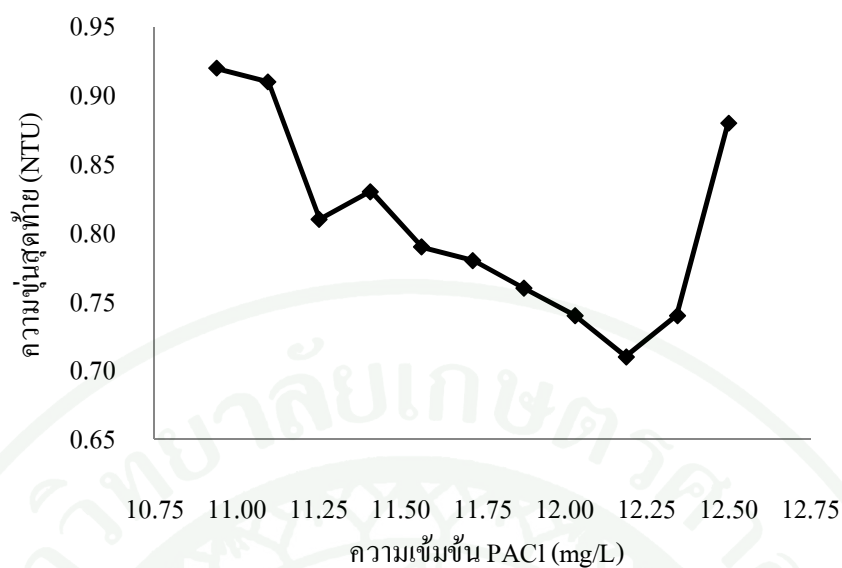
การศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของดิบกับปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ทำการทดลองกับน้ำดิบจากอ่างสกลนครภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร และใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นสารสร้างตะกอน ความขุ่นน้ำดิบที่ใช้ในการทดลอง คือ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 NTU โดยอัตราการกวนเร็ว กวนช้า (Velocity Gradient, G) และระยะเวลาในการกวน(t) จำลองมาจากระบบการผลิตน้ำประปาของวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ตามตารางที่ได้ผลการทดลองตามภาพที่



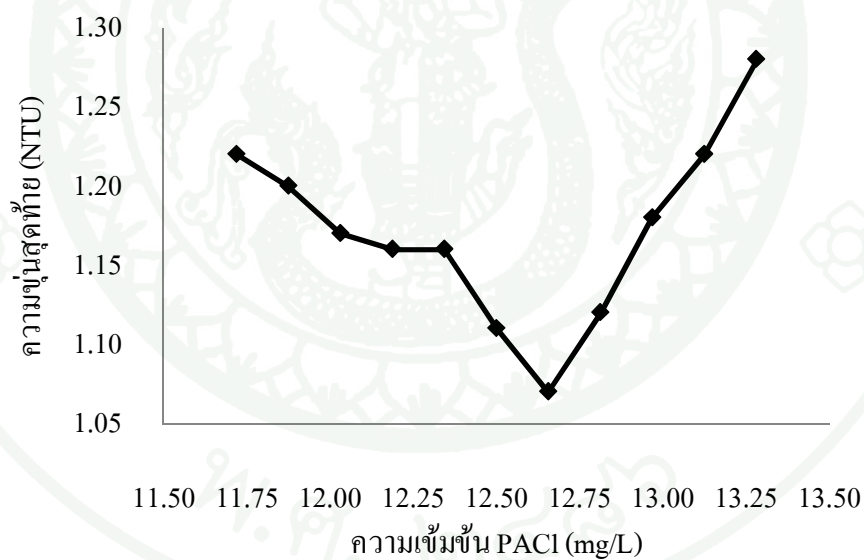
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 10 NTU



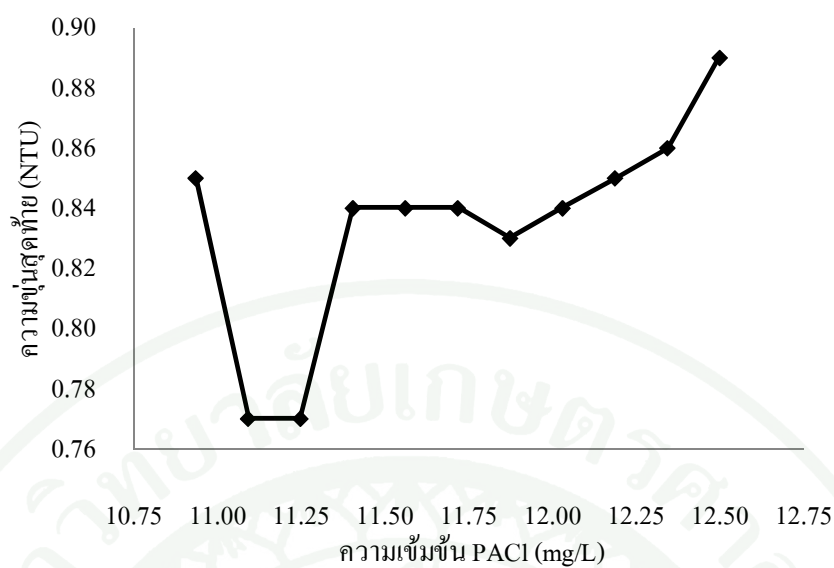
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 15 NTU



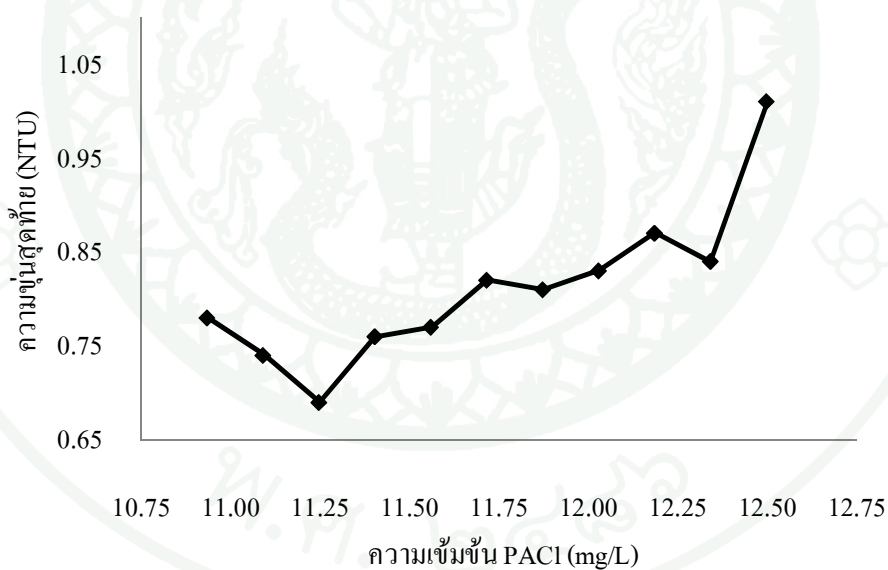
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 20 NTU



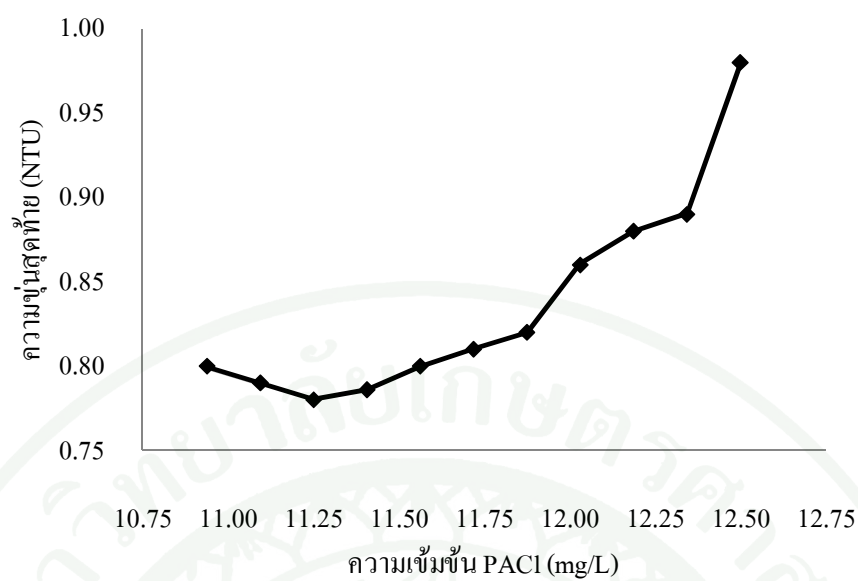
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 25 NTU



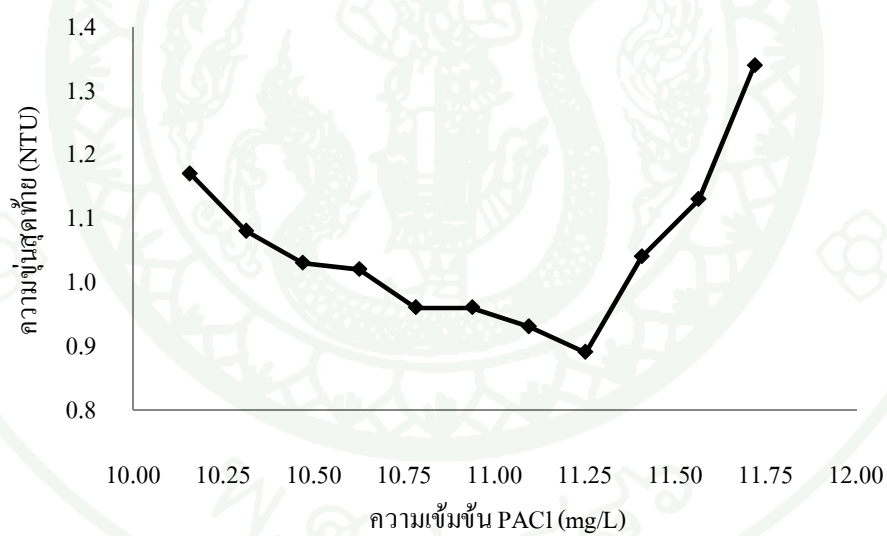
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 30 NTU



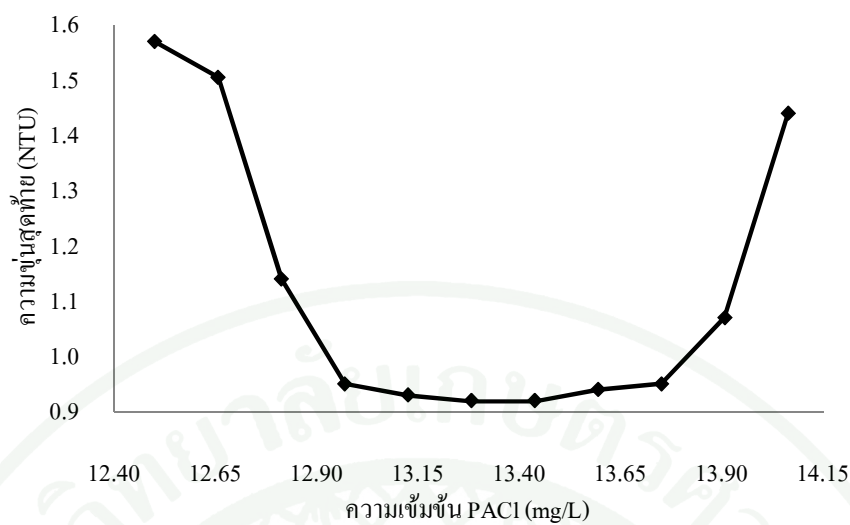
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 35 NTU



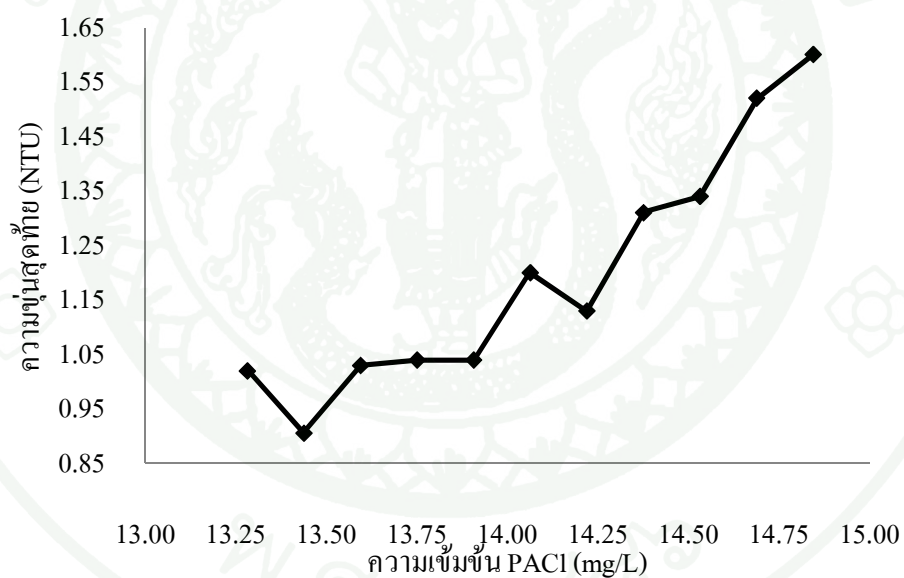
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 40 NTU



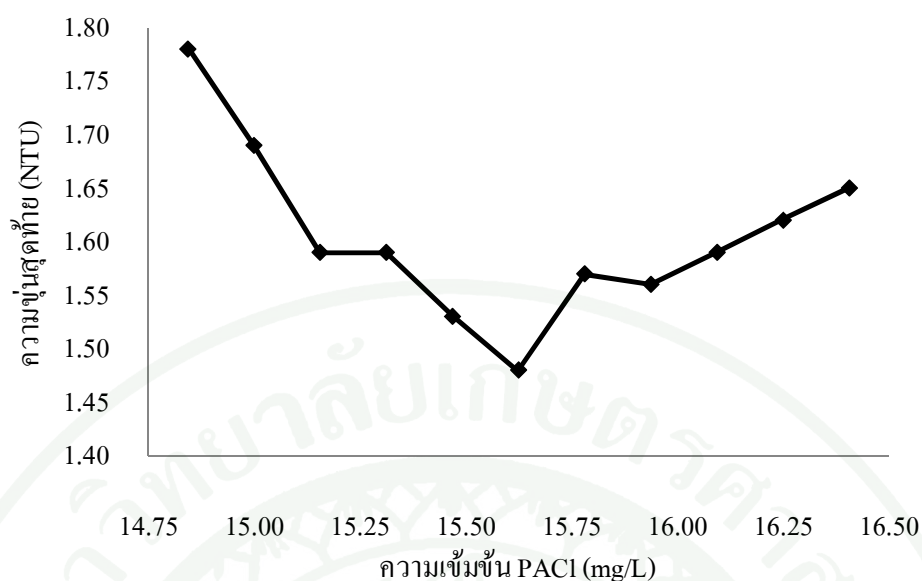
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 45 NTU



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 50 NTU



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 55 NTU

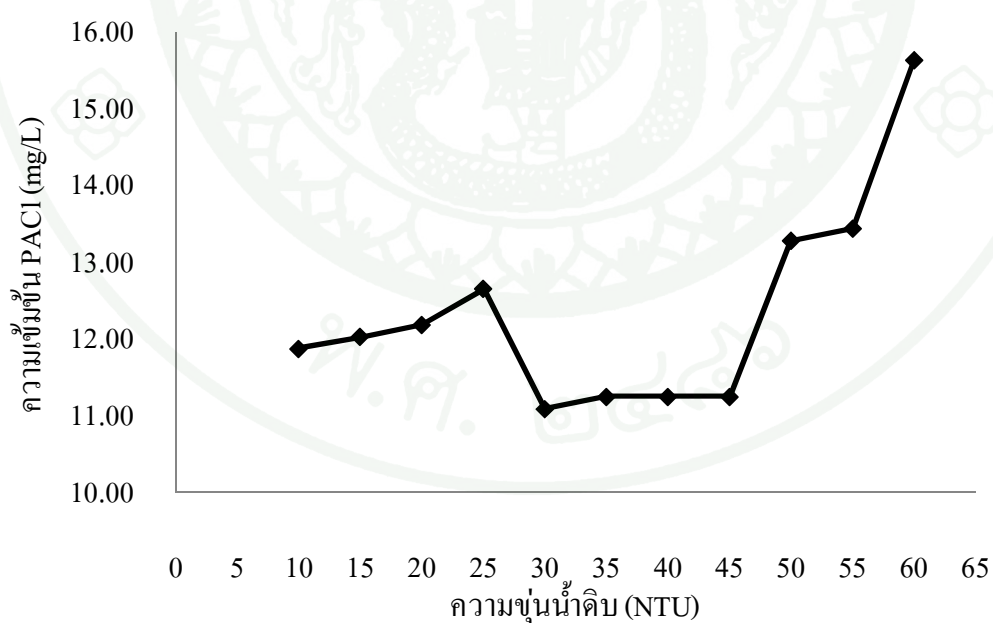


ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าความขุ่นน้ำดิบ 60 NTU

ภาพที่ 25-34 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน (Optimum dose) กับความขุ่นของน้ำดิบในช่วงความขุ่น 10-60 NTU จะเห็นได้ว่าทุกช่วงความเข้มข้นของ PACl ที่ได้ทำการทดลองนั้น ทำให้ความขุ่นสุดท้ายของน้ำมีค่าต่ำกว่า 2 NTU ทุกค่า แต่ความเข้มข้น PACl ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าความขุ่นสุดท้ายของน้ำมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมต่อค่าความขุ่นของน้ำดิบนั้นๆ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 12 และภาพที่ 35 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนและความขุ่นน้ำดิบของอ่างสกลนคร ภายในวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ตารางที่ 11 ปริมาณสารสร้างตะกอน (PACl) และค่าความขุ่นสุดท้าย

ความขุ่นน้ำดิบ (NTU)	ปริมาณ PACl (mg/L)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)
10	11.88	0.99
15	12.03	0.94
20	12.19	0.71
25	12.66	1.07
30	11.09 และ 11.25	0.77
35	11.25	0.69
40	11.25	0.78
45	11.25	0.89
50	13.28 และ 13.44	0.92
55	13.44	0.91
60	15.63	1.48



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอน และความขุ่นของน้ำดิบช่วง 10-60 NTU

ดังนั้น Optimum dose ที่เหมาะสมกับความขุ่นน้ำดิบ ทำการทดลองในช่วงความขุ่น 10-60 NTU ได้ผลการทดลองตามภาพที่ 25-35 และตารางที่ 12 ซึ่งค่าความขุ่นน้ำดิบส่วนมากแล้วจะอยู่ในช่วง 10-40 NTU (ภาพที่ 18) จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงความขุ่น 10-40 NTU ความเข้มข้น PACI ประมาณ 13 mg/L ก็เพียงพอต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา ที่สามารถทำให้ค่าความขุ่นสุดท้ายของน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนมีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU ซึ่งถือว่าผ่านมาตรฐาน แต่ข้อที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งคือ ที่ความขุ่น 30-45 NTU เป็นช่วงที่น้ำดิบต้องการปริมาณ PACI ในความเข้มข้นน้อยที่สุด เท่ากับ 11.25 mg/L อาจเป็นได้ว่าที่ความขุ่นช่วงนี้ เป็นช่วงที่ PACI สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบของอ่างสกลนคร ดังนั้นอีกแนวทางหนึ่งนอกเหนือจากการปรับสภาพความเป็นค่าของน้ำดิบ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายเรื่องสารสร้างตะกอนในระบบผลิตน้ำประปา ก็ต้องปรับความขุ่นน้ำดิบที่เข้าระบบให้อยู่ในช่วง 30-45 NTU

4.1 การทดลองเดินระบบผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

การสังเกตปริมาณสารสร้างตะกอน (PACI) ที่เพียงพอกับค่าความขุ่น

1. ตามทฤษฎีสังเกตจากค่าความขุ่นสุดท้ายน้อยที่สุด
2. การสังเกตด้วยตาเปล่าดูจากลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น
 - ถ้าปริมาณสารสร้างตะกอนไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดตะกอนขนาดเล็กและเบา ไม่รวมตัวและไม่ตกตะกอน ตะกอนเบาจะลอยกระจายตลอดความยาวของถังตกตะกอน รวมไปถึงรางรับน้ำใส
 - ถ้าปริมาณสารสร้างตะกอนพอดีกับค่าความขุ่นของน้ำดิบ จะเกิดตะกอนขนาดใหญ่และหนัก จะรวมตัวตกตะกอนภายในระยะทาง 1 ใน 3 ของความยาวถังตกตะกอน
 - ถ้าปริมาณสารสร้างตะกอนมากเกินไป จะทำให้เกิดตะกอนขนาดใหญ่และหนัก แต่ไม่รวมตัวและตกตะกอน ตะกอนจะลอยกระจายตลอดความยาวของถังตกตะกอน รวมถึงรางรับน้ำใส

ตารางที่ 12 การปรับ % ป้อนจ่ายสารเคมี และค่าความขุ่นของน้ำ

% ป้อน	ค่าความขุ่น (NTU)		
	กลางถึงตกตะกอน	วางรับน้ำใส	เฉลี่ย
28	2.36	1.67	2.015
30	1.74	1.17	1.455
32	1.92*	0.93	1.425
34	3.01	1.80	2.405

หมายเหตุ *เกิดฝนตกเล็กน้อยช่วงต้นของการทดลอง และก่อนทำการวัดค่าความขุ่นมีตะกอนก้นบ่อต้นตัว ขึ้นมา ทำให้ค่าความขุ่นที่ได้มากกว่าค่าความเป็นจริง

4.2 การคำนวณปริมาณการจ่ายสารและค่าใช้จ่ายในระบบการผลิตน้ำประปา

ระบบมีอัตราการผลิต $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ ($= 150,000 \text{ L/hr}$)

การผสมสารสร้างตะกอน (PACl) 25 กิโลกรัม ต่อ น้ำ 800 ลิตร

ความเข้มข้นเริ่มต้น 31.25 g/L

PACl 1 กระสอบหนัก 25 กิโลกรัม ราคา กิโลกรัมละ 24.50 บาท

พิจารณา การทดลองเดินระบบผลิตน้ำประปา วันที่ 28 สิงหาคม 2552

น้ำดิบมีค่าความขุ่น 11.51 NTU

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (ที่สลกนคร) ควรเติม PACl เท่ากับ 0.01208 g/L

เท่ากับอัตราจ่ายสารของปั๊มที่ 28%

ในระบบการผลิตมีอัตราการจ่ายสารของปั๊มที่ 35% คิดเป็น 0.01542 g/L

แต่จากการทดลองเดินระบบควรปรับอัตราการจ่ายสารที่ 32% คิดเป็น 0.01417 g/L

ดังนั้น จากการเดินระบบต้องปรับอัตราการจ่ายสารมากกว่าค่าจากการทดลองในห้องปฏิบัติการเพิ่มอีก 4%

4.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิต

เดือนสิงหาคม 2552 มีอัตราการจ่ายสารเฉลี่ย 35% จำนวนการผลิตน้ำเฉลี่ย 15.45 ชั่วโมง

จากการทดลองเดินระบบมีอัตราการจ่ายสารมากเกินไป 3% (35-32) คิดเป็น 0.00125 g/L

ในเวลา 1 ชั่วโมง ระบบมีอัตราการผลิตน้ำ 150,000 L

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นใน 1 ชั่วโมงจะมีปริมาณ PACl สูญเสียไป} &= 150,000 \text{ L} \times 0.00125 \text{ g/L} \\ &= 187.5 \text{ g} \\ &= 0.1875 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น ใน 1 ชั่วโมงจะมีปริมาณ PACl สูญเสียไป 0.1875 กิโลกรัม

ใน 1 วัน มีการผลิตน้ำเฉลี่ย 15.45 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นใน 1 วันจะมีปริมาณ PACl สูญเสียไป} &= 0.1875 \text{ kg} \times 15.45 \text{ hr} \\ &= 2.896 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น ใน 1 วันจะมีการสิ้นเปลือง PACl ประมาณ 3 กิโลกรัม หรือใน 1 เดือนจะมีการสิ้นเปลืองคิดเป็น 93 กิโลกรัม

ราคา PACl คิดเป็นกิโลกรัมละ 24.50 บาท

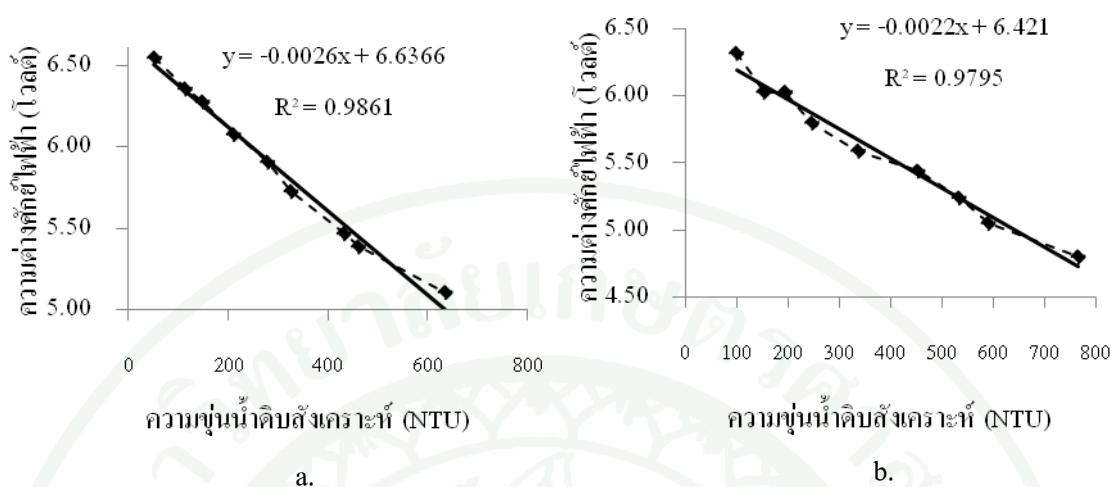
$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ใน 1 เดือน มีการสูญเสียค่าใช้จ่ายไป} &= 93 \text{ kg} \times 24.50 \\ &= 2,278.50 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ดังนั้น ใน 1 ปี จะมีการสูญเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 27,342 บาท

5. การประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่น

5.1 กรณีที่ 1 : ใช้หลอด LED สีแดง 1.5 โวลต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง

5.1.1 การเลือกลักษณะของภาชนะใส่สารตัวอย่าง

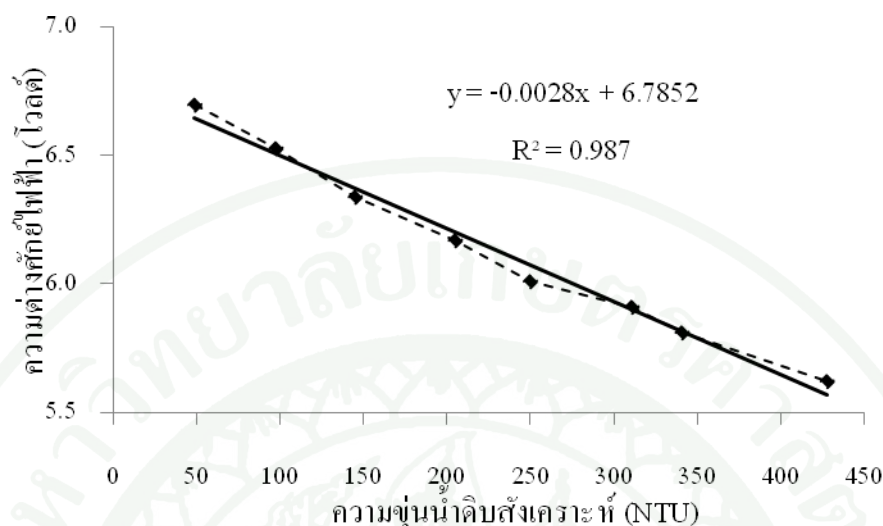


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นและความต่างศักย์ไฟฟ้า

- เมื่อใช้ภาชนะใส่ตัวอย่างทรงกระบอก
- เมื่อใช้ภาชนะใส่ตัวอย่างทรงสี่เหลี่ยม

จากการทดลองเมื่อพิจารณา ค่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ และความต่างศักย์ไฟฟ้า (R^2) ตามภาพที่ 36 a และ b จะเห็นว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเลือกภาชนะใส่ตัวอย่างทรงกระบอก เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน มากกว่าภาชนะทรงสี่เหลี่ยม จากนั้นทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ผลตามภาพที่ 37

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้า



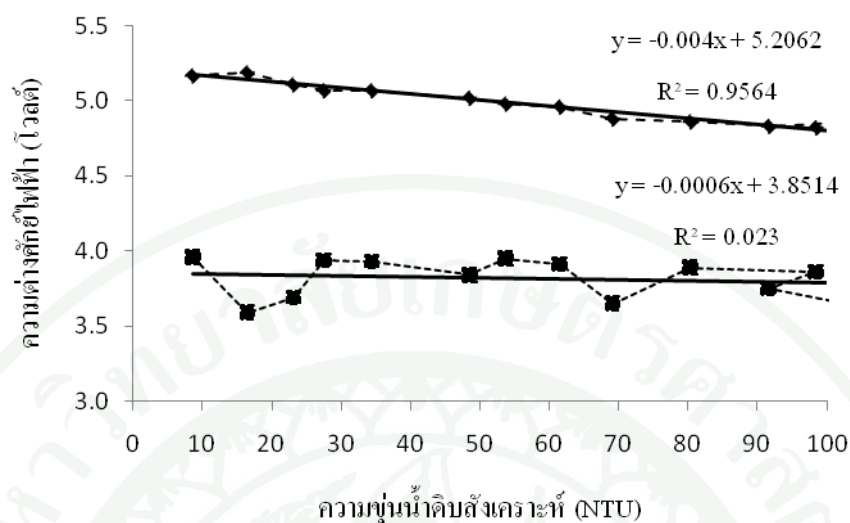
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของน้ำและความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้หลอด LED

จากภาพที่ 37 เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพกับน้ำดิบตามธรรมชาติ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการวัดค่าความต่างศักย์แล้วเทียบหาความขุ่นจากกราฟ พบว่าค่าความขุ่นที่อ่านได้จากกราฟ และจากเครื่อง 2100 AN ให้ผลที่แตกต่างกันมากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้เกิน 50 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากกราฟที่สร้างขึ้นกำหนดช่วงความขุ่นที่มาก ในขณะที่ค่าความขุ่นของแหล่งน้ำผิวดินมีค่าความขุ่นที่น้อย อีกกรณีหนึ่งคือแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ให้ความยาวคลื่น เพียง 607-617 นาโนเมตร ซึ่งยังมีค่าน้อยเกินไป ตามข้อกำหนดของ ISO 7027 Section 3 ที่กำหนดให้ควรใช้แหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นมากกว่า 800 นาโนเมตร ในการวัดการกระเจิงแสงของอนุภาค ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงแหล่งกำเนิดแสงตามกรณีที่ 2 และใช้ฟิลาเตอร์สีแดงเป็นตัวคัดแยกความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด โดยฟิลาเตอร์สีแดงจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด แล้วยอมให้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 617-780 นาโนเมตร ผ่านออกมาได้

5.2 กรณีที่ 2 : ใช้หลอดไส้ หรือ Tungsten lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้ฟิลาเตอร์สีแดง

5.2.1 การเลือกกำลังของหลอดไส้

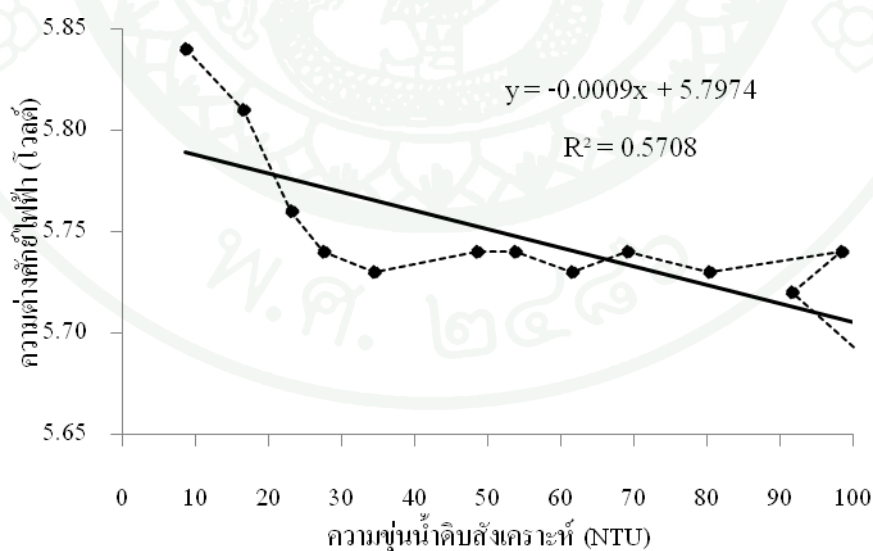
5.2.1.1 หลอดขนาด 6 โวลต์



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ 6 โวลต์

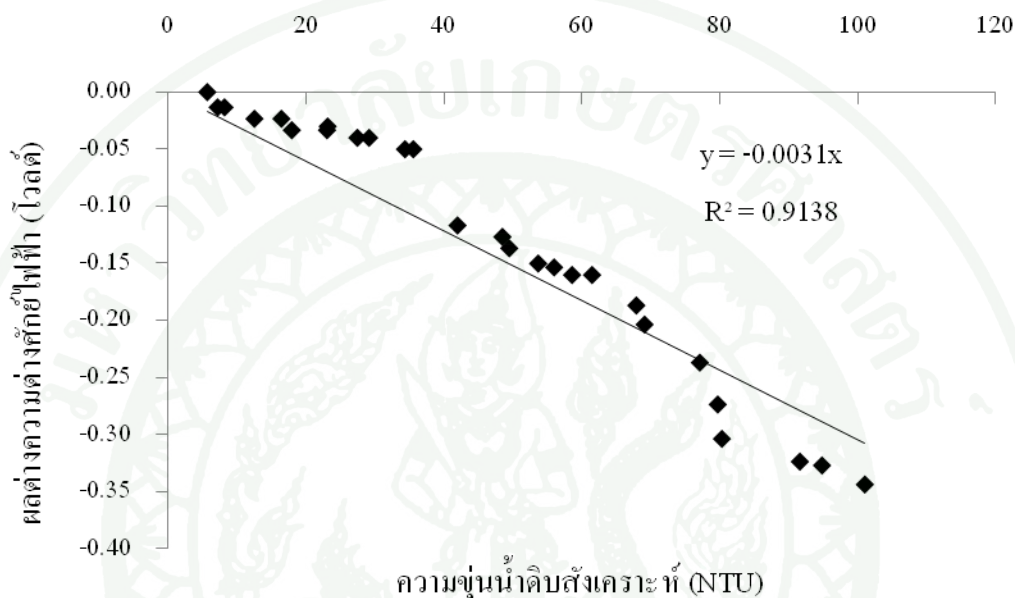
- ปรับหม้อแปลงให้จ่ายไฟไปยังหลอดไฟ 6 โวลต์
- ปรับหม้อแปลงให้จ่ายไฟไปยังหลอดไฟ 4 โวลต์

5.2.1.2 หลอดขนาด 12 โวลต์



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อใช้หลอดไส้ 12 โวลต์

จากภาพที่ 38 และ 39 เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จะเห็นว่าควรใช้หลอดไส้ที่สามารถรับกำลังไฟได้ 6 โวลต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง และปรับหม้อแปลงให้จ่ายไฟให้หลอด 6 โวลต์ ประดิษฐ์อุปกรณ์ตามภาพที่ 16 ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำและผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (น้ำกลั่น – น้ำตัวอย่าง) ได้ตามภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟیلเตอร์สีแดง

ภาพที่ 40 เป็นภาพมาตรฐานที่ใช้ในการใช้เทียบค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง เมื่อรู้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้

สมการของกราฟความสัมพันธ์ $y = -0.0031x$

เมื่อ $y =$ ผลต่างความต่างศักย์ตัวอย่าง – ความต่างศักย์น้ำกลั่น

$x =$ ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ (NTU)

กำหนดให้ $x' =$ ความขุ่นของน้ำตัวอย่าง ($x' = x$)

ดังนั้น จะทราบความขุ่นน้ำตัวอย่าง ตามสมการ

$$x' = \frac{y}{-0.0031} \text{ NTU}$$

5.2.1.3 การเก็บตัวอย่างแหล่งน้ำผิวดินมาทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟิลเตอร์สีแดง

สถานที่	ประเภทแหล่งน้ำ	ลักษณะทางกายภาพ	ความต่างศักย์ที่วัดได้ (โวลต์)
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	บึง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	4.99
2. ตลาดน้ำอโยธยา	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	4.99
3. อ่างเก็บน้ำช้างอนสุวารีฯพระนครศรีอยุธยา	บึง	น้ำใสมาก ความขุ่นน้อย	5.03
4. คลองเมือง	คลอง	น้ำใส สีน้ำตาลอ่อนๆ	4.98
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี*	สระน้ำ	น้ำใส มีตะกอนสาหร่ายเล็กน้อย	4.97
6. แม่น้ำป่าสัก	แม่น้ำ	น้ำค่อนข้างใส ความขุ่นเล็กน้อย	4.95
7. คลองประปาบางเขน	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลอ่อนๆ	4.94
8. แม่น้ำลพบุรี	แม่น้ำ	น้ำขุ่นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อน	4.89
9. บึงพระราม	คลอง	น้ำมีสีเขียวมาก	4.76
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่*	สระน้ำ	น้ำขุ่นมาก มีสีน้ำตาลเข้ม	4.62

หมายเหตุ *ตัวอย่างที่ 5 และ 10 เก็บตัวอย่างน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตัวอย่างอื่นๆเก็บตัวอย่างที่อุทยาน ขกเว้นตัวอย่างที่ 7

5.2.1.4 การคำนวณเทียบความขุ่นตัวอย่างน้ำผิวดิน

ตารางที่ 14 การคำนวณเทียบค่าความขุ่น และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟิลเตอร์สีแดง

สถานที่	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)			ความขุ่นน้ำดิบ		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	น้ำกลั่น	ที่วัดได้	ผลต่าง	จากการคำนวณ	จาก 2100 AN (NTU)	
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	5.00	4.99	-0.01	3.23	3.77	14.4
2. ตลาดน้ำอโยธยา	5.00	4.99	-0.01	3.23	5.90	45.3
3. อ่างเก็บน้ำข้างอนุสาวรีย์พระนเรศวรมหาราช	5.00	5.03	0.03	-9.68	7.70	225.7
4. คลองเมือง	5.00	4.98	-0.02	6.45	12.1	46.7
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	5.00	4.97	-0.03	9.68	16.1	39.9
6. แม่น้ำป่าสัก	5.00	4.95	-0.05	16.1	17.1	5.7
7. คลองประปาบางเขน	5.00	4.94	-0.06	19.4	23.7	18.3
8. แม่น้ำลพบุรี	5.00	4.89	-0.11	35.5	45.5	22.0
9. บึงพระราม	5.00	4.76	-0.24	77.4	66.7	16.1
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	5.00	4.62	-0.38	122.6	158	22.4

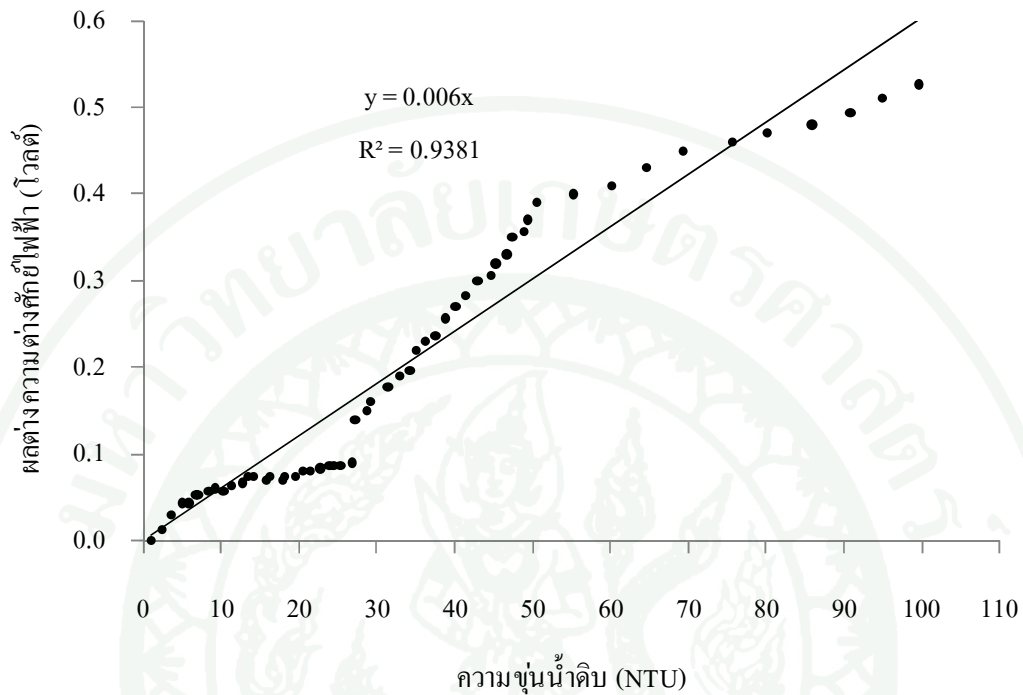
จากตารางที่ 14 แหล่งน้ำที่เครื่องวัดความขุ่นสามารถวัดค่าความขุ่นของน้ำได้ใกล้เคียงกับเครื่องวัดความขุ่นรุ่น 2100 AN ที่สุดคือแม่น้ำลพบุรี มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 9 ยังถือว่ามีความผิดพลาดมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนมาใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน ซึ่งปล่อยคลื่นแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 440-490 นาโนเมตร เทียบกับฟิลเตอร์สีฟ้าอ่อน ของเครื่อง 2100 AN ให้ความยาวคลื่นเดียวที่ 455 นาโนเมตร (USEPA 180.1) นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ห่มุมตัวด้านทานไวแสง (LDR) เพิ่มเติมได้ผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ห่มุมตัวด้านทานไวแสง

ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ (NTU)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) ที่มุมต่างๆ		
	12°	90°	12° + 90 °
น้ำกลั่น	1.02	0.49	1.45
4.94	1.09	0.48	1.42
7.01	1.10	0.50	1.47
9.21	1.11	0.48	1.48
12.7	1.12	0.50	1.49
13.5	1.13	0.48	1.50
18.1	1.15	0.50	1.53
20.5	1.16	0.49	1.54
24.5	1.20	0.51	1.57
ความต่างศักย์ขณะปิดไฟ	0.00	0.00	0.02
ความต่างศักย์ขณะเปิดไฟ	2.12	0.34	2.27

จากตารางที่ 15 จะเห็นได้ว่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดคือมุม 12 องศา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ H.H. Kleizen, A.B. de Putter, M. van der Beek และ S.J. Huynink ดังนั้นผู้วิจัยจึงปรับโครงสร้างของเครื่องวัดความขุ่นจากเดิมที่วัดในมุม 12 และ 90 องศา (ภาพที่ 16) ให้เหลือแค่มุม 12 องศาเดียว แต่กรณีที่มีมุม 12°+90° มีค่าความต่างศักย์มากกว่ามุมอื่นเนื่องมาจากผลของตัวด้านทานที่ต่อเข้าไปกับตัวด้านทานไวแสง

5.3 กรณีที่ 3 : ใช้หลอดไส้ หรือ Tungsten lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟิลเตอร์สีน้ำเงิน

สมการของกราฟความสัมพันธ์ $y = 0.0062x - 0.0065$

เมื่อ $y =$ ผลต่างความต่างศักย์น้ำตัวอย่าง – ความต่างศักย์น้ำกลั่น

$x =$ ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ (NTU)

กำหนดให้ $x' =$ ความขุ่นของน้ำตัวอย่าง ($x' = x$)

ดังนั้น จะทราบความขุ่นน้ำตัวอย่าง ตามสมการ

$$x' = \frac{y + 0.0065}{0.0062} \text{ NTU}$$

5.3.1 การเก็บตัวอย่างแหล่งน้ำผิวดินมาทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟิเตอร์สีน้ำเงิน

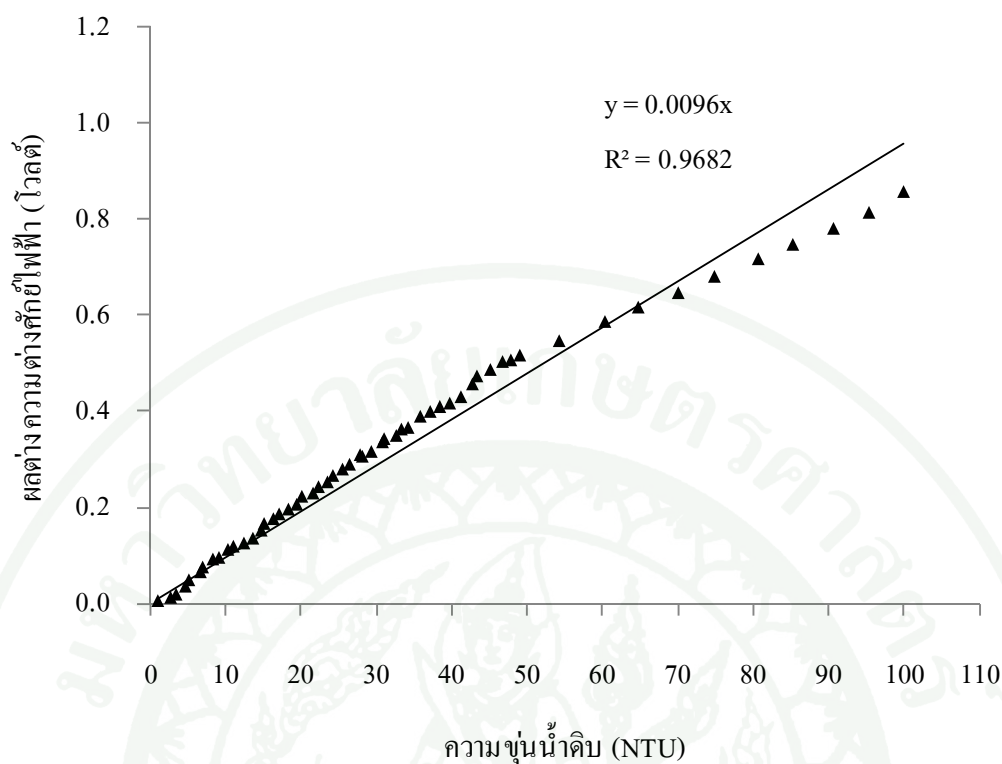
สถานที่	ประเภทแหล่งน้ำ	ลักษณะทางกายภาพ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (โวลต์)
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	บึง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	1.02
2. ตลาดน้ำอโยธยา	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	1.03
3. อ่างเก็บน้ำข้างอนุสาวรีย์พระนเรศวร มหาราช	บึง	น้ำใสมาก ความขุ่นน้อย	1.04
4. คลองเมือง	คลอง	น้ำใส สีน้ำตาลอ่อนๆ	1.07
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	สระน้ำ	น้ำใส มีตะกอนสาหร่ายเล็กน้อย	1.09
6. แม่น้ำป่าสัก	แม่น้ำ	น้ำค่อนข้างใส ความขุ่นเล็กน้อย	1.11
7. คลองประปาบางเขน	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลอ่อนๆ	1.14
8. แม่น้ำลพบุรี	แม่น้ำ	น้ำขุ่นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อน	1.23
9. บึงพระราม	คลอง	น้ำมีสีเขียวมาก	1.29
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	สระน้ำ	น้ำขุ่นมาก มีสีน้ำตาลเข้ม	1.55

หมายเหตุ *ตัวอย่างที่ 5 และ10 เก็บตัวอย่างน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตัวอย่างอื่นๆเก็บตัวอย่างที่อุทยานฯ ยกเว้นตัวอย่างที่ 7

5.3.2 การคำนวณเทียบความชุ่มตัวอย่างน้ำผิวดิน

ตารางที่ 17 การคำนวณเทียบค่าความชุ่ม และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน

สถานที่	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)			ความชุ่มน้ำดิบ		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	ที่วัดได้	น้ำกลั่น	ผลต่าง	จากการคำนวณ	จาก 2100 AN (NTU)	
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	1.02	1.00	0.02	3.33	3.77	11.6
2. ตลาดน้ำอโยธยา	1.03	1.00	0.03	5.00	5.90	15.3
3. อ่างเก็บน้ำข้างอนุสาวรีย์พระนเรศวร มหาราช	1.04	1.00	0.04	6.67	7.70	13.4
4. คลองเมือง	1.07	1.00	0.07	11.7	12.1	3.6
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	1.09	1.00	0.09	15.0	16.1	6.8
6. แม่น้ำป่าสัก	1.11	1.00	0.11	18.3	17.1	-7.2
7. คลองประปาบางเขน	1.14	1.00	0.14	23.3	23.7	1.5
8. แม่น้ำลพบุรี	1.23	1.00	0.23	38.3	45.5	15.8
9. บึงพระราม	1.29	1.00	0.29	48.3	66.7	27.5
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	1.55	1.00	0.55	91.7	158	42.0



5.4 กรณีที่ 4 : ใช้หลอดไส้ หรือ Tungsten lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้ฟิลเตอร์ของ 2100 AN

ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้หลอดไส้ขนาด 6 โวลต์ และฟิลเตอร์เครื่อง 2100 AN

สมการของกราฟความสัมพันธ์ $y = 0.0088x + 0.0399$

เมื่อ $y =$ ผลต่างความต่างศักย์น้ำตัวอย่าง – ความต่างศักย์น้ำกลั่น

$x =$ ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ (NTU)

กำหนดให้ $x' =$ ความขุ่นของน้ำตัวอย่าง ($x' = x$)

ดังนั้น จะทราบความขุ่นน้ำตัวอย่าง ตามสมการ

$$x' = \frac{y - 0.0399}{0.0088} \text{ NTU}$$

5.4.1 การเก็บตัวอย่างแหล่งน้ำผิวดินมาทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 18 การวิเคราะห์แหล่งน้ำผิวดินกรณีใช้ฟیلเตอร์เครื่อง 2100 AN

สถานที่	ประเภทแหล่งน้ำ	ลักษณะทางกายภาพ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (โวลต์)
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	บึง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	1.06
2. ตลาดน้ำอโยธยา	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	1.08
3. อ่างเก็บน้ำช้างอนุสาวรีย์พระนเรศวร มหาราช	บึง	น้ำใสมาก ความขุ่นน้อย	1.09
4. คลองเมือง	คลอง	น้ำใส สีน้ำตาลอ่อนๆ	1.14
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	สระน้ำ	น้ำใส มีตะกอนสาหร่ายเล็กน้อย	1.17
6. แม่น้ำป่าสัก	แม่น้ำ	น้ำค่อนข้างใส ความขุ่นเล็กน้อย	1.19
7. คลองประปาบางเขน	คลอง	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลอ่อนๆ	1.23
8. แม่น้ำลพบุรี	แม่น้ำ	น้ำขุ่นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อน	1.39
9. บึงพระราม	คลอง	น้ำมีสีเขียวมาก	1.48
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	สระน้ำ	น้ำขุ่นมาก มีสีน้ำตาลเข้ม	1.92

หมายเหตุ *ตัวอย่างที่ 5 และ 10 เก็บตัวอย่างน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตัวอย่างอื่นๆเก็บตัวอย่างที่อุทยานฯ ยกเว้นตัวอย่างที่ 7

5.4.2 การคำนวณเทียบความชุ่มตัวอย่างน้ำผิวดิน

ตารางที่ 19 การคำนวณเทียบค่าความชุ่ม และความผิดพลาดของเครื่องมือ กรณีใช้ฟิลเตอร์เครื่อง 2100 AN

สถานที่	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)			ค่าความชุ่มน้ำดิบ		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
	ที่วัดได้	น้ำกลั่น	ผลต่าง	จากการคำนวณ	จาก 2100 AN (NTU)	
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	1.06	1.00	0.06	6.25	3.77	65.8
2. ตลาดน้ำอโยธยา	1.08	1.00	0.08	8.33	5.90	41.2
3. อ่างเก็บน้ำข้างอนุสาวรีย์พระนเรศวร มหาราช	1.09	1.00	0.09	9.38	7.70	21.8
4. คลองเมือง	1.14	1.00	0.14	14.6	12.1	20.5
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	1.17	1.00	0.17	17.7	16.1	10.0
6. แม่น้ำป่าสัก	1.19	1.00	0.19	19.8	17.1	15.7
7. คลองประปาบางเขน	1.23	1.00	0.23	24.0	23.7	1.1
8. แม่น้ำลพบุรี	1.39	1.00	0.39	40.6	45.5	10.7
9. บึงพระราม	1.48	1.00	0.48	50.0	66.7	25.0
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	1.92	1.00	0.92	95.8	158	39.3

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้ฟิลเตอร์ต่างๆ

สถานที่	ลักษณะทางกายภาพ	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของฟิลเตอร์		
		สีแดง	สีน้ำเงิน	จากเครื่อง 2100 AN
1. ตลาดน้ำคลองสระบัว	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	14.4	11.6	65.8
2. ตลาดน้ำอโยธยา	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลเล็กน้อย	45.3	15.3	41.2
3. อ่างเก็บน้ำข้างอนุสาวรีย์พระนเรศวรมหาราช	น้ำใสมาก ความขุ่นน้อย	225.7	13.4	21.8
4. คลองเมือง	น้ำใส สีน้ำตาลอ่อนๆ	46.7	3.6	20.5
5. สระน้ำหน้าตึก 50 ปี	น้ำใส มีตะกอนสาหร่ายเล็กน้อย	39.9	6.8	10.0
6. แม่น้ำป่าสัก	น้ำค่อนข้างใส ความขุ่นเล็กน้อย	5.7	-7.2	15.7
7. คลองประปาบางเขน	น้ำใส ความขุ่นน้อย สีน้ำตาลอ่อนๆ	18.3	1.5	1.1
8. แม่น้ำลพบุรี	น้ำขุ่นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อน	22.0	15.8	10.7
9. บึงพระราม	น้ำมีสีเขียวมาก	-16.1	27.5	25.0
10. อ่างน้ำหน้าหอประชุมใหญ่	น้ำขุ่นมาก มีสีน้ำตาลเข้ม	22.4	42.0	39.3

จากการทดลองเทียบค่าความขุ่น เมื่อเปลี่ยนฟิลเตอร์จากสีแดง มาเป็นสีน้ำเงินพบว่า เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีแนวโน้มที่ลดลง และจากการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากรณีของ ฟิลเตอร์สีแดง ($\lambda = 617-780 \text{ nm}$) ค่าความต่างศักย์ของน้ำกลั่นมีค่ามากกว่าน้ำตัวอย่าง ในขณะที่ ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน ($\lambda = 440-490 \text{ nm}$) ความต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างมากกว่าน้ำกลั่น ตรงตาม ทฤษฎีของการกระเจิงแสงของอนุภาค ที่กล่าวว่ายิ่งมีอนุภาคมากเท่าไร การกระเจิงแสงก็จะมาก ตาม ซึ่งฟิลเตอร์สีแดงให้ผลที่ตรงกันข้าม คือยิ่งอนุภาคมาก (ความขุ่นมาก) ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ ยิ่งน้อยลง หมายถึงอนุภาคมีการดูดกลืนแสง ทำให้แสงที่ผ่านไปยังตัววัดน้อยลง ซึ่งตรงกับหลักการ วัดความขุ่นแบบ Turbidimetry วิธีนี้จะวัดปริมาณแสงที่ส่องทะลุความขุ่น อีกสาเหตุหนึ่งที่พอจะ สามารถอธิบายผลการทดลองนี้คือ แสงที่ผ่านฟิลเตอร์สีแดงความยาวคลื่นไม่ถึง 800 นาโนเมตร ตามที่ ISO 7027 กำหนดไว้ ทำให้ผลไม่เป็นไปตามหลักของการกระเจิงแสง ผู้วิจัยก็ยังไม่มั่นใจว่าที่ ความยาวคลื่นมากกว่า 800 นาโนเมตรนั้น การทดลองจะได้ผลตามทฤษฎีหรือไม่ แต่ผลการทดลอง ที่น่าจะยืนยันในข้อกำหนดนี้ได้คือ การวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากบึงพระราม และอ่างหน้าหอประชุม ใหญ่ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้ฟิลเตอร์สีแดงน้อยกว่าฟิลเตอร์สีน้ำเงิน และ จากเครื่อง 2100 AN ตามตารางที่ 21

แต่ในกรณีของการวิเคราะห์โดยใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน เทียบกับ ฟิลเตอร์สีฟ้าจากเครื่อง 2100 AN พบว่าเมื่อใช้ฟิลเตอร์จากเครื่อง 2100 AN ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่ดีกว่าเมื่อ ใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน (ภาพที่ 42 เทียบกับ ภาพที่ 41) ถึงแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะค่อนข้างมีความ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เพราะฟิลเตอร์ของ 2100 AN สามารถแยกคลื่นแสงให้ออกมา เป็นคลื่นแสงเดี่ยว ที่ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร ตรงตาม U.S. Standard ซึ่งกำหนดให้ความยาว คลื่นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในช่วง 400-600 นาโนเมตร ก่อนที่จะมีการปรับปรุงและแก้ไขตาม ISO 7027

ข้อจำกัดของเครื่องมือที่ประดิษฐ์ คือ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ยังมีคุณสมบัติไม่เพียงพอ เช่น ฟิลเตอร์ที่ใช้ควรมีอุปกรณ์ชนิดอื่นเสริม เพื่อที่จะสามารถแยกคลื่นแสงออกมาเป็นคลื่นลำแสงเดี่ยว หรือต้องเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำฟิลเตอร์ซึ่งต้องอาศัยต้นทุนที่สูงขึ้น และในส่วนของระบบอ่านและ ประมวลผล ควรที่จะมีอุปกรณ์ขยายค่าความต่างศักย์ให้มีค่าที่ละเอียดขึ้น หรือต้องมีการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการอ่านและประมวลผล เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่น ตามหลักการกระเจิงของแสง ควรวัดแสงที่กระเจิงในมุม 12 องศา ดีกว่ามุม 90 องศา
2. ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ควรมากกว่า 800 นาโนเมตร ($\lambda = 860 \text{ nm}$) สามารถลดความผิดพลาดที่เกิดจากสีของสารตัวอย่างได้
3. ถึงแม้ว่าการประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่นครั้งนี้ยังได้ผลที่ไม่ดีพอ แต่ก็สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจหาค่าความขุ่นน้ำหลังผ่านกระบวนการผลิตได้ โดยที่น้ำที่มีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU ผลต่างระหว่างความต่างศักย์ที่วัดได้กับความต่างศักย์ของน้ำกลั่น จะมีค่าไม่เกิน 0.04 โวลต์
4. จากการทดลองคุณภาพน้ำดิบอย่างสกลนคร พบว่าค่าความขุ่นของน้ำไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ส่วนมากจะอยู่ในช่วง 10-40 NTU ต้องการปริมาณ PACl ประมาณ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าความขุ่นสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการน้อยกว่า 5 NTU ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม แต่ค่าความขุ่นน้ำดิบที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตอยู่ในช่วง 30-45 NTU เพราะต้องการปริมาณ PACl เพียง 11.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. จากการวิเคราะห์สภาพความเป็นด่างพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 17-23 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ CaCO_3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคุณภาพน้ำดิบที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำประปา ที่กำหนดไว้ว่าสภาพความเป็นด่างควรมีอย่างน้อย 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ CaCO_3 ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการ Coagulation ไม่ดีเท่าที่ควร

ข้อเสนอแนะ

1. ควรที่จะมีการศึกษาและแหล่งทุนสนับสนุน ในการวิจัยและประดิษฐ์เครื่องวัดความขุ่น รวมถึงไปถึงเครื่องมือที่ใช้ในงานวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการส่งเสริมความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี
2. ควรศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการเพิ่มค่าความขุ่นของน้ำก่อนเข้าระบบผลิตน้ำประปาให้อยู่ในช่วง 30-45 NTU เพื่อเป็นการลดปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้ในระบบ
3. ควรเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพความเป็นด่างของน้ำ ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ CaCO_3 เพื่อให้กระบวนการสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2541. **วิศวกรรมประปา**. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

โกมล ศิวะบวร, เขาวุธ พรมิลเทพ และสุวิทย์ ชูมนุมศิริวัฒน์. 2527. **การประปาเบื้องต้น**.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2547. **สเปกโทรสโกปีด้าน การวิเคราะห์** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันจุลเวสม์. 2542. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 1**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

แม่น อมรสิทธิ์. 2552. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. โรงพิมพ์ชวนพิมพ์,
กรุงเทพฯ.

อุดร จารรัตน์ และจารรัตน์ วรรณิสากุล. 2537. **วิศวกรรมการประปา**. เรือแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

Ames, R.S., Jr. 1976. **The effect of certain anions oh the coagulation of kaolin clay with sulfate**. M.S. thesis, Illinois Inst. Of Technology., Chicago, Illinois.

APHA, AWWA and WEF. 1992. **Standard methods of examination of water and wastewater.18th ed.** American Pubic Health Association. Washington, DC. 1220 p.

Clair N.Sawyer L. McCarty and Gene F. Parkin. 2003. **Chemistry for Environmental Engineering and Science fifth edition**. McGraw – Hill Book Company.

Cleasby, J.L. 1990. **Water Quality and Treatment (A Hand Book of Community Water Supplies) 4th ed.** McGraw – Hill. Inc., New York.

- Edie K., Yamaguchi D., Hoshikawa and Shirozu T. 2005. **New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbidimeter with two optical systems in series.** Water Research 40 (2006) 683-691
- Hongve D. and Åkesson G. 1998. **Comparison of Nephelometric Turbidity Measurements using wavelengths 400-600 and 860 nm.** PII : S0043-1354(98)00051-7. Water Research 32, No. 10, pp. 3143-3145
- Hundt, T.R. and C.R. O' Melia. 1988. **Aluminum – Fulvic acid interaction : mechanisms and applications.** J. Amer. Wat Works Assoc. 80(4) : 176 – 186
- Kawamura, S. 1976. **Consideration on improving flocculation.** J. AWWA. 68 : 328 -336
- _____ and R.R. Trussell. 1991. **Main features of large water treatment plants in Japan.** J. AWWA. 83(6) : 56 – 62
- Kleizen H.H., de Putter A.B., van der Beek M. and Huynink S.J. 1995. **Particle concentration, size and turbidity.** Particle concentration and size analysis *based on a presentation at the Filtech Europa 93 Conference in Karlsruhe, Germany on 19 October 1993*
- Nilsson, R. 1992. **Residual aluminium concentration in drinking water after treatment with aluminium of iron salts or apatite – health aspects.** J. Wat. Supply 10(4) ; 55 – 64
- O' Melia, C.R. 1972. **Coagulation and flocculation. Physicochemical Process for Water Quality Control.** W.J. Weber, Jr. Wiley Interscience, New York. 640 p.
- Packham, R.F. and D.D. Ratnayaka. 1992. **Water clarification with aluminium coagulants in the UK.** J.Wat. Supply 10(4) : 35 – 48

Professor John Gregory. 1997. **Turbidity and Beyond.** *Presented at the Filtration Society Meeting on 'Instrumentation in Water Filtration Processes' at University College, London on 24 Joun 1997*

Pouillot, M. and H. Sudy. 1992. **High – basicity polymeric aluminum salts for drinking – water production.** J. Wat .Supply 10(4) : 133 – 154

Ryukichi obara. Japan water works association. 1978. **Design Criteria for Waterworks Facilities.**

Sawyer, C.N., and McGarty, P.L. 1967. **Chemistry for Sanitary Engineers.** McGraw – Hill Book Company. New York.

Simpson, A.M., W. Hatton and M. Brockbank. 1988. **Alumiium, its use and control, in potable water.** J. Envir. Tech. Lett. 9(9) : 909 – 916

Snell F.D. and Snall C.T. 1948. **Colorimetric Method of Analysis Including Some Turbidimetric and Nephelometric Meyhods.** D.van Nostrand Company. Inc. Princeton. New Jersey New York.

Stell, E.W. and Terence J. McGhee. 1979. **Water Supply and Sewrage 5th ed.** McGraw – Hill Book Company. New York. 206 – 239

Syed R. Qasim ; Edward M. Motley . Guang Zhu. 2000. **Water Works Engineering planning, design and operation.** Prentice Hall PTR.

Tom D. Reynolds and Paul A. Richards. 1996. **Unit operation and Processes in Environmental Engineering. 2rd ed.** PWS Publishing Company.

Viraraghavan, T and C.H. Wimmer. 1988. **Polyaluminum chloride as an alternative to alum coagulation – a case study.** J. Aqua 6 : 316 – 321

Weber, JR. 1972. **Physicochemical Processes for Water Quality Control**. John Wiley & Sons. Inc., New York.







ภาคผนวก ก

รายการคำนวณระบบผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร

รายการคำนวณระบบผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัด
สกลนคร (ตามรายการออกแบบระบบ)

1. อัตราไหลที่ใช้ในการออกแบบ (Design Flow)

กำลังผลิตที่ต้องการ (Plant Capacity)	=	150	ลบ.ม./ชม.
	=	0.042	ลบ.ม./วท.

2. ท่อผสมเร็ว (Static Mixer)

ท่อผสมเร็ว จำนวน 1 ชุด

อัตราการไหลในการออกแบบท่อผสมเร็ว	=	150	ลบ.ม./ชม.
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อผสมเร็ว	=	250	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อผสมเร็ว	=	0.07	ตร.ม.
ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านท่อผสมเร็ว	=	0.042/0.07	ม./วท.
	=	0.6	ม./วท.
ความยาวของท่อผสมเร็ว	=	5 × รัศมีของท่อผสมเร็ว	
	=	5 × 0.25	ม.
	=	1.25	ม.
เวลากักเก็บน้ำในท่อผสมเร็ว	=	V/Q	
	=	(0.07×1.25)/0.042	วท.
	=	2	วท.
ที่ความเร็ว 0.6 ม./วท.			
ความดันสูญเสียในท่อผสมเร็ว	≈	0.14	ม.

จาก

$$G = \sqrt{\frac{\Delta h g}{v t}}$$

เมื่อ	G	=	ความเร็วแกรเดียนท์ (s ⁻¹)
	Δh	=	ความดันสูญเสีย (m)
	g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s ²)
	v	=	ความหนืดจลน์ของน้ำ (m ² /s)

$$t = \text{เวลากักเก็บน้ำ (s)}$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$G = \sqrt{\frac{0.14 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{1 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 2 \text{ s}}}$$

$$= 828 \text{ s}^{-1}$$

$$G \times t = 828 \text{ s}^{-1} \times 2 \text{ s}$$

$$= 1656$$

หมายเหตุ ข้อกำหนดของการกววนเร็วค่า G ไม่ต่ำกว่า 300 s^{-1} , t 30-60 s

3. บ่อรับน้ำและบ่อแบ่งน้ำ (Receiving well and Distribution Box)

บ่อรับน้ำ

$$\text{ปริมาตรของบ่อรับน้ำ} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง}$$

$$= 1.00 \times 4.15 \times 1.90$$

$$= 7.90 \text{ m}^3$$

$$\text{เวลากักน้ำ (t)} = \frac{V}{Q}$$

$$= \frac{7.9 \text{ m}^3}{150 \text{ m}^3/\text{hr}} \times 60 \text{ min/hr}$$

$$= 3.16 \text{ min}$$

บ่อแบ่งน้ำ

ใช้หลักการแบ่งน้ำตามความสูงของน้ำที่ไหลข้ามฝายน้ำรูปตัว V มุม 60°

$$\text{อัตราการล้นข้ามฝายวัดน้ำที่ใช้ในการออกแบบ} = 75 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$= 0.021 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{อัตราการล้นข้ามฝายวัดระดับ} \quad Q = 2.55H^{5/2}$$

$$\text{ความดันน้ำสูญเสียที่น้ำล้นข้ามฝายวัดน้ำ} \quad H = (Q/2.55)^{2/5}$$

ความดันน้ำสูญเสียในเส้นท่อจากบ่อแบ่งน้ำเข้าถังกวนช้า

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ} = 250 \text{ mm}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดท่อ} = 0.049 \text{ m}^2$$

$$\text{อัตราการไหลในท่อ (V)} = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{0.021 \text{ m}^3/\text{s}}{0.049 \text{ m}^2}$$

$$= 0.43 \text{ m/s}$$

ค่า k ที่น้ำเข้าท่อ = 0.5, ค่า k น้ำออกท่อ = 1.0, ค่า k ที่ประตูน้ำ = 0.25

ค่า k ที่ท่อน้ำโค้ง 90° จำนวน 2 ชุด = $2 \times 0.5 = 1.0$

$$\text{ความดันน้ำสูญเสีย (h)} = \frac{\sum k v^2}{2g}$$

$$= \frac{2.75 \times 0.48 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$= 0.10 \text{ m}$$

4. ถังผสมช้า และถังตกตะกอน (Flocculation Basin and Sedimentation Basin)

ถังกวนช้าแบบ Baffle Wall

$$\begin{aligned} \text{จำนวนถังกวนช้า} &= 2 \text{ บ่อ} \\ \text{เวลากักเก็บที่ต้องการ} &= 29 \text{ นาที } (\approx 30 \text{ นาที}) \\ \text{อัตราการไหลในแต่ละบ่อ} &= 75 \text{ m}^3/\text{hr} \\ \text{ปริมาตรบ่อ} &= 75 \text{ m}^3/\text{hr} \times \frac{30}{60} \\ &= 37.5 \text{ m}^3 \\ \text{ใช้บ่อขนาด ยาว} \times \text{กว้าง} \times \text{ลึก} &= 6.55 \text{ m} \times 5.6 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \\ \text{ปริมาตรสุทธิของบ่อ} &= 37.9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

การกวนช้าโดยใช้ Baffle Wall แบ่งการผสมออกเป็น 3 stage มีค่า G ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Stage ที่ 1 } G &= 50 \text{ s}^{-1} \\ \text{Stage ที่ 2 } G &= 30 \text{ s}^{-1} \\ \text{Stage ที่ 3 } G &= 10 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

สำหรับการไหลในช่องทางตรง $K = 1.0$

สำหรับการไหลในช่องวกกลับ $K = 1.4$

ค่า K ในแต่ละ Stage = $(12 \times 1.0) + (2 \times 1.4) = 14.8$

$$\text{ความดันสูญเสียในแต่ละ Stage } h = \frac{G^2 \gamma C}{g Q}$$

$$\text{ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านช่องเปิด } v = \sqrt{\frac{2hg}{\sum K}}$$

ความลึกน้ำ $D = 2.0 \text{ m}$

$$\text{ความกว้างของช่องเปิด } w = \frac{Q}{vD}$$

ตารางผนวกที่ ก1 พารามิเตอร์ของการกวนซ้ำ

Stage	G(s ⁻¹)	V(m ³)	h (m)	v (m/s)	w (m)
1	50	12.5	0.136	0.424	0.04
2	30	12.5	0.049	0.225	0.07
3	10	12.5	0.005	0.081	0.21



การคำนวณปริมาณการจ่ายสารสร้างตะกอน โรงผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา
เขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร

คำนวณจาก Calibration Curve ความเข้มข้น PACl เริ่มต้น 31.25 กรัมต่อลิตร

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณการจ่ายสารสร้างตะกอน

% การจ่ายสาร	Q การจ่ายสาร (L/hr)	ปริมาณPACl (g/hr)	ปริมาณ PACl (mg/L)
10	18	562.50	3.75000
11	20	625.00	4.16667
12	22	687.50	4.58333
13	26	812.50	5.41667
14	28	875.00	5.83333
15	30	937.50	6.25000
16	32	1000.00	6.66667
17	35	1093.75	7.29167
18	36	1125.00	7.50000
19	40	1250.00	8.33333
20	42	1312.50	8.75000
21	45	1406.25	9.37500
22	46	1437.50	9.58333
23	48	1500.00	10.00000
24	50	1562.50	10.41667
25	52	1625.00	10.83333
26	54	1687.50	11.25000
27	56	1750.00	11.66667
28	58	1812.50	12.08333
29	60	1875.00	12.50000
30	63	1968.75	13.12500
31	65	2031.25	13.54167

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

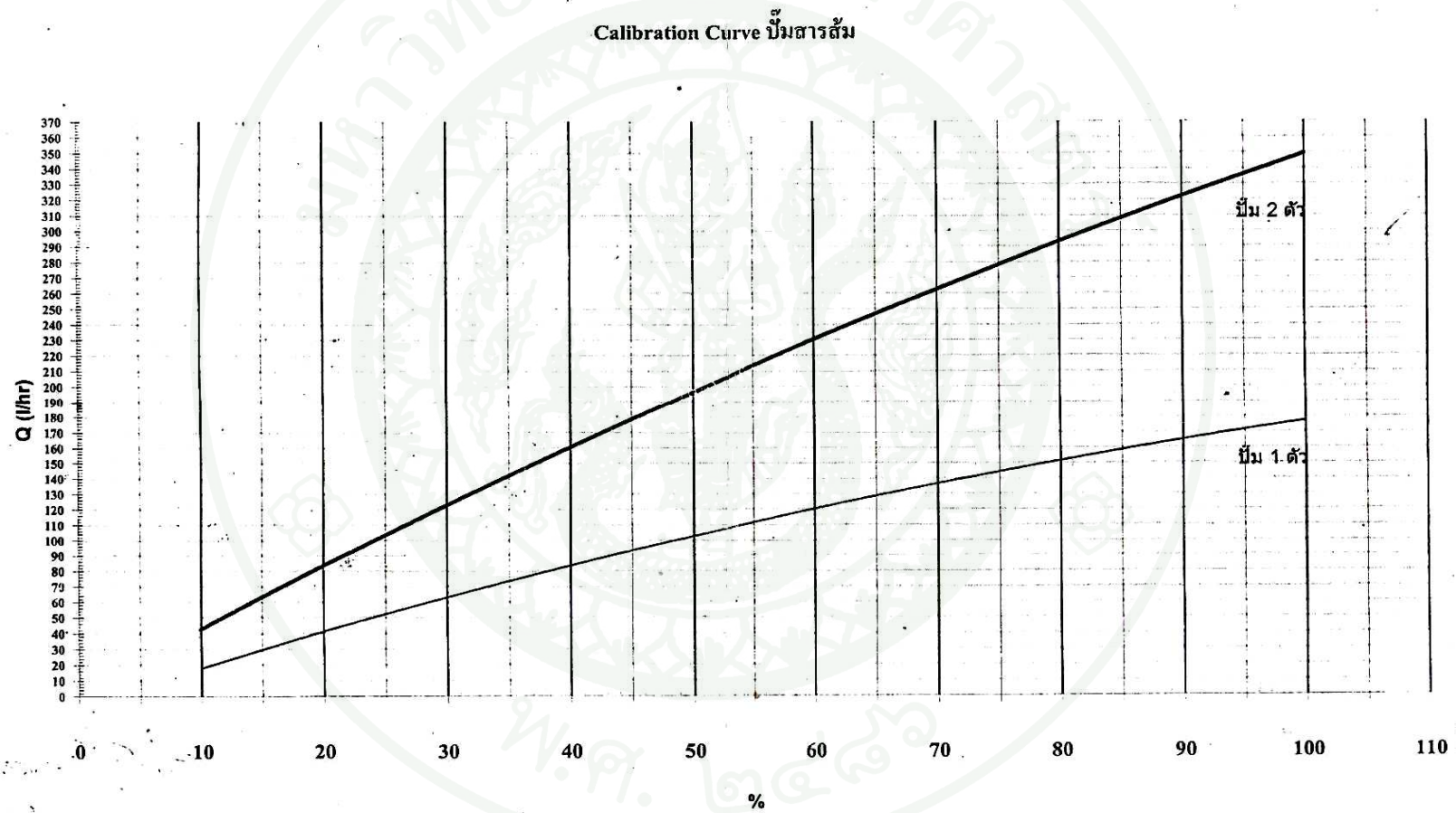
% การจ่ายสาร	Q การจ่ายสาร (L/hr)	ปริมาณPACl (g/hr)	ปริมาณ PACl (mg/L)
32	68	2125.00	14.16667
33	70	2187.50	14.58333
34	72	2250.00	15.00000
35	74	2312.50	15.41667
36	76	2375.00	15.83333
37	78	2437.50	16.25000
38	80	2500.00	16.66667
39	82	2562.50	17.08333
40	83	2593.75	17.29167
41	86	2687.50	17.91667
42	88	2750.00	18.33333
43	90	2812.50	18.75000
44	92	2875.00	19.16667
45	94	2937.50	19.58333
46	95	2968.75	19.79167
47	97	3031.25	20.20833
48	99	3093.75	20.62500
49	101	3156.25	21.04167
50	103	3218.75	21.45833
51	104	3250.00	21.66667
52	107	3343.75	22.29167
53	109	3406.25	22.70833
54	110	3437.50	22.91667
55	112	3500.00	23.33333
56	114	3562.500	23.75000
57	115	3593.750	23.95833
58	116	3625.000	24.16667

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

% การจ่ายสาร	Q การจ่ายสาร (L/hr)	ปริมาณPACl (g/hr)	ปริมาณ PACl (mg/L)
59	118	3687.500	24.58333
61	122	3812.50	25.41667
62	124	3875.00	25.83333
63	126	3937.50	26.25000
64	128	4000.00	26.66667
65	129	4031.25	26.87500
66	130	4062.50	27.08333
67	132	4125.00	27.50000
68	133	4156.25	27.70833
69	136	4250.00	28.33333
70	137	4281.25	28.54167
71	139	4343.75	28.95833
72	140	4375.00	29.16667
73	141	4406.25	29.37500
74	142	4437.50	29.58333
75	144	4500.00	30.00000
76	145	4531.25	30.20833
77	146	4562.50	30.41667
78	147	4593.75	30.62500
79	150	4687.50	31.25000
80	151	4718.75	31.45833
81	152	4750.00	31.66667
82	154	4812.50	32.08333
83	156	4875.00	32.50000
84	158	4937.50	32.91667

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

% การจ่ายสาร	Q การจ่ายสาร (L/hr)	ปริมาณPACl (g/hr)	ปริมาณ PACl (mg/L)
85	160	5000.00	33.33333
86	161	5031.25	33.54167
87	162	5062.50	33.75000
88	163	5093.75	33.95833
89	164	5125.00	34.16667
90	165	5156.25	34.37500
91	166	5187.50	34.58333
92	168	5250.00	35.00000
93	170	5312.50	35.41667
94	171	5343.75	35.62500
95	172	5375.00	35.83333
96	173	5406.25	36.04167
97	174	5437.50	36.25000
98	175	5468.75	36.45833
99	167	5218.75	34.79167
100	180	5625.00	37.50000



ภาพผนวกที่ ข1 ปัสสาวะส้ม

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวรัตนภรณ์ เทพมาลัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2527
สถานที่เกิด	ลำพูน
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรีคณะวิทยาศาสตร์ วิชาเอกเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-