

การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการกรอง  
ที่มีเศษคอนกรีตเป็นสารกรอง



นางสาว พูนศิริ สิ้นธุรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-584-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF EFFLUENT FROM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANT  
USING FILTRATION CONCRETE RUBBISH MEDIA

MISS POONSIRI SINTHURAT

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Departmental Program in Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-584-7



พูนศิริ สิ้นธุรัตน์ : การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการกรองที่มี  
 เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง (IMPROVEMENT OF EFFLUENT FROM DOMESTIC WASTEWATER  
 TREATMENT PLANT USING FILTRATION CONCRETE RUBBISH MEDIA)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ , 108 หน้า. ISBN 974-346-584-7

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการกรองที่ใช้เศษคอนกรีตมาใช้เป็นสารกรองเพื่อปรับปรุงคุณภาพ  
 น้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 มาแล้วจากอาคารวิทยกิตติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังกรองบรรจุ  
 เศษคอนกรีตเพื่อป้อนน้ำเสียแบบไหลลงซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ 0.044 ม. ความสูงของคอลัมน์  
 2.5 ม. โดยกำหนดตัวแปร ได้แก่ ขนาดของเศษคอนกรีต (0.4-0.6 มม. , 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม.) อัตรา  
 การไหลของน้ำ (1 , 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.) และ ระดับความลึกของชั้นสารกรอง (0.5 , 1.0 และ 1.5 ม.)  
 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร(ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส)พิจารณาจากค่าดัชนีคุณภาพน้ำ  
 ที่เปลี่ยนแปลงในรูปของสภาพความเป็นกรดต่าง ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนโตรเจน-  
 ทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร(ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส)  
 ที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการทดสอบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.  
 อัตราการไหลของน้ำ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต 1.5 ม. ปริมาณน้ำที่กรองได้  
 46.8 ลิตร ที่เวลาเดินระบบ 6 ชั่วโมง โดย ความเป็นกรดต่างของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองเท่ากับ 8.4 และ  
 สามารถลดค่าของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน และ  
 ฟอสฟอรัสทั้งหมดได้เฉลี่ยร้อยละ 89.3 , 46.8 , 24.2 , 22.7 , 49.4 และ 53.6 ตามลำดับ ดังนั้น เศษคอนกรีตซึ่ง  
 เป็นวัสดุเหลือใช้และหาได้ง่ายในท้องถิ่นสามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารในน้ำทิ้งชุมชนมีความเป็นไปได้  
 ได้สูงสำหรับนำมากำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมด

ภาควิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
 ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4072337523 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: WASTEWATER / REMOVAL / CONCRETE / FILTRATION / DOMESTIC

POONSIRI SINTHURAT: IMPROVEMENT OF EFFLUENT FROM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANT USING FILTRATION CONCRETE RUBBISH MEDIA. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR THARES SRISATIT, Ph.D. 108 pp. ISBN 974-346-584-7.

Concrete Rubbish was used as a media filter in order to treat the effluent of domestic wastewater from Vittayakit Building of Chulalongkorn University. The column test was used in this study by using column of 0.044 m. diameter and 2.5 m. height. Three important parameters were the size of concrete rubbish ( 0.4-0.6 mm., 0.7-1.2 mm. and 1.6-2.0 mm.), the flow rate of influent (1, 5 and 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-hr.) and the depth of concrete filter (0.5, 1.0 and 1.5 m.) respectively. The treatment efficiency of domestic wastewater was determined by the percent removal in terms of pH, Suspended Solid (SS), Chemical Oxygen Demand (COD), Ammonia-Nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), Total Nitrogen (TN), Nitrate-Nitrogen (NO<sub>3</sub>-N) and Total Phosphorus (TP) .

The results showed that efficiency removal significant at p>0.05 was size of 1.6-2.0 mm., flow rate 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-hr. and depth 1.50 m. at 6 hrs.. The pH of effluents was 8.4 and the other parameters as; SS, COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, NO<sub>3</sub>-N and TP were reduced at the average of 89.3, 46.8, 24.2, 22.7, 49.4, and 53.6 respectively. This study indicated that concrete rubbish can use as filtration media for the effluent of domestic wastewater treatment especially for NO<sub>3</sub>-N and TP removal.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Science

Field of study Environmental Science

Academic year 2000

Student's signature \_\_\_\_\_

Advisor's signature \_\_\_\_\_

Co-advisor's signature \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นและสำเร็จได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือ ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และช่วยเตือนสติข้าพเจ้าเสมอมาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ล่วงลับไปแล้วที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เสมอมา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิพัฒน์ พัฒนาผลไพบูลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยเหลือยามข้าพเจ้าประสบปัญหาในการศึกษานี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.อรทัย ขวลาภาฤทธิ์ และ อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแก้ไข และแนะนำให้รายงานฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ปิยะธิตวิรกุล ที่ช่วยเหลือข้าพเจ้าในเรื่องของสถิติ และข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยของข้าพเจ้าในครั้งนี้

ในการทำวิจัยครั้งนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณสหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะ แวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และมูลนิธิชิน โสภณพนิชที่ให้ทุนสนับสนุน

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารวิทยกิตต์ทุกคนที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างน้ำ และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่แผนกกล คณะวิทยาศาสตร์ที่ช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ ๆ และน้องๆทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยของข้าพเจ้าสำเร็จลงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดคือคนที่สำคัญที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้า นั่นคือ ครอบครัวของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญของข้าพเจ้า และยังให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านเสมอมา และน้องๆที่น่ารักของข้าพเจ้าที่คอยส่งความห่วงใยและให้กำลังใจโดยตลอด

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ

บทที่		
1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
	2.1 น้ำทิ้งชุมชน.....	4
	2.2 แหล่งที่มาและผลกระทบของสารอินทรีย์และสารอาหาร ในแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	8
	2.3 การกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร.....	10
	2.4 การกรอง (Filtration).....	12
	2.5 คอนกรีต.....	19
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
	3.1 แผนการวิจัย.....	32
	3.2 การเตรียมอุปกรณ์และติดตั้งเครื่องมือ.....	33
	3.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสีย.....	35
	3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและวิจารณ์ผล.....	36
	4.1 ผลการหาลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2	ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....36
4.3	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกรองของเศษคอนกรีต.....37
4.4	ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนขนาดของเศษคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ.....38
4.5	ปริมาณน้ำที่ผลิตได้และน้ำล้างย้อน.....53
4.6	ผลของระดับความลึกของเศษคอนกรีตที่มีต่อประสิทธิภาพในการ กำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร.....54
4.7	ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอาหารเมื่อใช้ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้า ระบบที่แตกต่างกัน .....59
4.8	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของ กระบวนการกรอง.....61
5	สรุปผลการทดลอง.....66
6	ข้อเสนอแนะ.....69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้วิจัย.....	108



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ลักษณะน้ำทิ้งจากอาคารประเภทต่างๆของชุมชนในประเทศไทย.....7
2.2	อัตราน้ำเสียและปริมาณบีโอดีจากอาคารในประเทศไทย.....8
4.1	ข้อมูลแสดงลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต.....36
4.2	คุณภาพน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียอาคารวิทยกิตติ.....37
4.3	ปริมาณน้ำที่ผลิตได้และน้ำล้างย้อน.....54
4.4	แสดงค่าเฉลี่ยของสารอินทรีย์และสารอาหารเข้าและออกจากระบบที่ แต่ละระดับความลึกของเศษคอนกรีต.....55
4.5	แสดงผลของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร ที่ระดับความลึกของชั้นสารกรองแตกต่างกัน.....55
4.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษ คอนกรีต.....62
4.7	เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษ คอนกรีต.....64

## สารบัญรูป

หน้า

2.1	ลักษณะน้ำทิ้งชุมชน.....	6
2.2	กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง.....	14
2.3	กลไกการจับสารแขวนลอย.....	16
2.4	การเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต.....	20
2.5	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ใส่สารเติมคอนกรีตชนิดที่ทำให้เกิดฟองอากาศ.....	21
2.6	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใส่สารเติมคอนกรีตชนิดที่ทำให้เกิดฟองอากาศ.....	21
2.7	การจำแนกส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	23
2.8	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต.....	25
2.9	ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ $C_3A$ .....	26
2.10	ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite.....	27
3.1	แบบจำลองถังกรองและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	33
3.2	เศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และฟอสฟอรัสทั้งหมดกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกรอง.....	38
4.2	การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดต่างที่ขนาดเศษคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....	40
4.3	ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ขนาดเศษคอนกรีตคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....	43
4.4	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ขนาดเศษคอนกรีตคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....	45
4.5	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนที่ขนาดเศษคอนกรีตคอนกรีต และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.6	ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ขนาดเศษคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....49
4.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนที่ขนาดเศษคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....51
4.8	ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ขนาดเศษคอนกรีตและ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....53
4.9	การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดต่างที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต แตกต่างกัน.....56
4.10	ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต แตกต่างกัน.....56
4.11	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต แตกต่างกัน.....57
4.12	ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนที่ระดับความลึกของ ชั้นเศษคอนกรีตแตกต่างกัน.....57
4.13	ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ระดับความลึกของ ชั้นเศษคอนกรีตแตกต่างกัน.....58
4.14	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารที่ระดับความลึกของ ชั้นเศษคอนกรีตแตกต่างกัน.....58
4.15	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของ เศษคอนกรีต.....63

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำทิ้งจากชุมชน ได้แก่ น้ำทิ้งจากบ้านพักอาศัย อาคาร ร้านค้า ตลาด โรงแรม เป็นต้น ที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่นับวันจะเพิ่มขึ้นมาตามการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจ และกลายเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียสำคัญอันก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ซึ่งสารอินทรีย์และสารอาหารเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการลดลงของออกซิเจน และการเพิ่มขึ้นของกระบวนการยูโทรฟิเคชัน ในปัจจุบันนี้ระบบบำบัดน้ำทิ้งที่ใช้กันอยู่มักมีอุปสรรคในการทำงานและการควบคุมระบบอยู่มาก เช่น ระบบตะกอนเร่งซึ่งเป็นระบบที่ซับซ้อนต้องการการควบคุมอย่างใกล้ชิด มักเกิดปัญหาเกี่ยวกับการลอยตัวของตะกอนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งต่ำลง ดังนั้นจะมีปัญหาการเพิ่มปริมาณสารแขวนลอยในแหล่งน้ำอันเป็นสาเหตุให้ค่าบีโอดีและค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้สารอาหารคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดยังคงกลายเป็นปัญหาที่สำคัญต่อคุณภาพน้ำในปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารดังกล่าวนี้เป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชน้ำต่างๆ ถ้ามีปริมาณมากจะกระตุ้นให้พืชน้ำมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมแก่แหล่งน้ำนั้น

สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันทั่วไปนั้นประกอบด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ เคมีและชีววิทยา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำเสียที่เกิดขึ้น แต่วิธีการที่นิยมกันมากคือวิธีทางชีววิทยา ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวนี้มีราคาแพงทั้งในด้านค่าใช้จ่ายในการดูแลและรักษาระบบ ดังนั้นจึงมีการ ค้นหาวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีการดูแลไม่ยุ่งยากมากนัก ค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบต่ำมาใช้ซึ่งต้องคำนึงถึงความเหมาะสมต่อสภาพปัจจุบันด้วย

กระบวนการกรองเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นสูงเพื่อปรับปรุงน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วให้มีคุณภาพดีขึ้น มีหลักการกำจัดสารแขวนลอยในชั้นกรองซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของสารแขวนลอย สารกรอง คุณลักษณะทางเคมีของน้ำและอัตราการไหลของน้ำ การกำจัดจะเกิดขึ้นภายในชั้นกรองและประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับ 2 กลไกที่แตกต่างกัน คือ สารแขวนลอยขนาดใหญ่จะตกตะกอนหรือติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างการกรอง ส่วนสารแขวนลอยขนาดเล็กต้องอาศัยแรงที่เกิดจากการแพร่กระจายและกลไกแบบดูดติดผิว (มันลิน,2538)

การวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการที่จะนำเศษคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่มีรุกรุนหาได้ง่ายในท้องถิ่น และยังเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียชุมชน อันเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์และสารอาหาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของขนาด อัตราการไหลของน้ำและระดับความลึกของชั้นสารกรองที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรต-ไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด ในสภาวะการกรองที่เหมาะสมโดยใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง
2. ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการบำบัดนี้เป็นการบำบัดขั้นสุดท้ายของน้ำทิ้งด้วยระบบการกรองโดยใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง
2. ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองที่มีชั้นสารกรองเป็นเศษคอนกรีต
3. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพขั้นที่ 2 มาแล้วจากอาคารวิทยกิตต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบจากคุณภาพน้ำเข้าระบบและคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบ โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง(pH) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ซีโอดี(COD) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน(Ammonia-nitrogen) ไนเตรต-ไนโตรเจน (Nitrate Nitrogen) ไนโตรเจนทั้งหมด(Total Nitrogen) และฟอสฟอรัสทั้งหมดทั้งหมด ( Total Phosphorus)
5. ขนาดของสารกรอง ได้แก่ 0.4-0.6 มม. ,0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม.
6. อัตราการไหลของน้ำ ได้แก่ 1 , 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.
7. ระดับความลึกของชั้นสารกรองที่ระดับ 0.5 ม. , 1.0 ม. และ 1.5 ม.

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.เป็นแนวทางในการนำเศษคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์
- 2.เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโดยใช้กระบวนการกรองซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำทิ้งชุมชน

##### 2.1.1 องค์ประกอบน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน

น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7 ส่วนประกอบที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำมัน นอกจากนี้ยังมี ผงซักฟอก สาร Phenolic และพวก Pesticides เป็นต้น สำหรับสารอินทรีย์เป็นสารที่มีอยู่ในน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมด ซัลเฟอร์และก๊าซ เป็นต้น (แสดงดังรูปที่ 2.1)

#### 1. สารอินทรีย์

หมายถึง สารประกอบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และรวมกับธาตุอื่นตั้งแต่หนึ่งธาตุขึ้นไป ได้มาจากธรรมชาติ และสิ่งที่มีชีวิต เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เป็นต้น แต่ในปัจจุบันสารอินทรีย์หลายชนิดอาจเกิดจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม เช่น ยูเรีย (สารอินทรีย์) เกิดจากการนำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มาให้ความร้อน เป็นต้น

อย่างไรก็ตามยังมีสารประกอบบางชนิดแม้จะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแต่ไม่ถูกจัดว่าเป็นสารอินทรีย์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลีโกลคาร์บอนเนต และกลีโกลโบคาร์บอนเนต เป็นต้น

สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกละลายได้ง่ายโดยจุลชีพ เช่น แป้ง น้ำตาล เป็นต้น เมื่อถูกระบายลงแหล่งน้ำจะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำของแหล่งน้ำลดลงจนอาจทำให้เกิดการเน่าเหม็น การกำจัดสารเหล่านี้ออกจากน้ำสามารถทำได้ง่ายโดยนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพเป็นหลัก

ส่วนสารอินทรีย์ชนิดถูกละลายได้ยากโดยจุลชีพ เช่น สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และสารปราบศัตรูพืช เป็นต้น การกำจัดสารเหล่านี้อกจากน้ำมีความยุ่งยากมากกว่าการกำจัดสารอินทรีย์ที่ถูกละลายได้ง่ายโดยจุลชีพ

#### 2. สารอนินทรีย์

หมายถึง สารที่ไม่มีสารอินทรีย์ส่วนใหญ่มาจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น กลีโกลซัลเฟต กลีโกลคาร์บอนเนต และกลีโกลโบคาร์บอนเนต คลอไรด์ แคลเซียม โซเดียม เป็นต้น ถ้าสารเหล่านี้มากเกินไปทำให้น้ำนั้นไม่เหมาะแก่การใช้สอย เช่น มีรสกร่อย ไม่เหมาะแก่การอุปโภค บริโภค เป็นต้น

### 3. เชื้อโรค

เชื้อโรคคือจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคอาจเป็น แบคทีเรีย ไวรัส โปรโตซัว และอื่นๆ ซึ่งอาจมาจาก สิ่งที่ขับถ่ายจากมนุษย์ และสัตว์ที่ป่วย เชื้อโรคเหล่านี้อาจนำโรคมาสู่มนุษย์

### 4. ไข น้ำมัน และไขมัน

ส่วนใหญ่มาจากพืช และสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหาร สารเหล่านี้ส่วนใหญ่ลอยน้ำได้ ทำให้ แหล่งรับน้ำเสียเกิดสภาพไม่แน่นอน ขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนลงสู่ น้ำ ทำให้น้ำเน่าเสียง่ายขึ้น

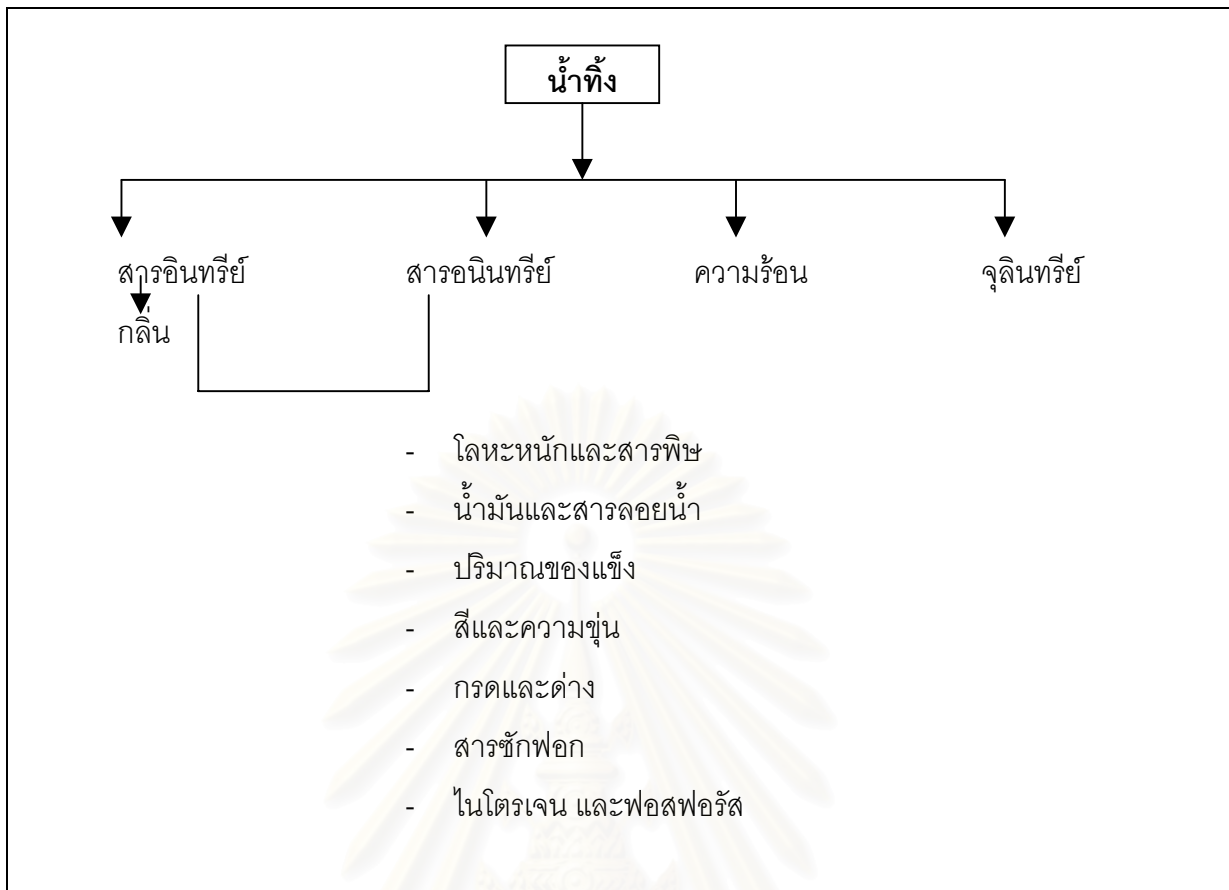
### 5. สารอาหารของพืช

ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ แต่ถ้าแหล่งน้ำมีสารเหล่านี้มากเกินไป อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่มีชื่อว่า ยูโทรฟิเคชัน โดยมีการ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมากมายของพืชน้ำ เช่น สาหร่าย เป็นต้น ปรากฏการณ์นี้จะทำให้แหล่งน้ำ มีสีเขียวจัด ออกซิเจนละลายน้ำจะสูงมากในเวลา กลางวัน แต่จะลดต่ำลงในเวลากลางคืนจนอาจเป็น อันตรายต่อสัตว์น้ำ

### 6. ของแข็งแขวนลอย

หมายถึงของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ อยู่ในลักษณะแขวนลอยในน้ำเสีย เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำทำให้น้ำขุ่น และเมื่อความเร็วของน้ำลดลงของแข็งดังกล่าวนี้ จะตกตะกอนทำให้เกิดการตื้นเขินตลอดจนอาจเกิดการย่อยสลาย (ของแข็งที่เป็นที่สารอินทรีย์) แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่บริเวณส่วนล่างของแหล่งน้ำ ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตตลอดจนการขยายพันธุ์ของสัตว์น้ำบางชนิด





รูปที่ 2.1 ลักษณะของน้ำทิ้งชุมชน

### 2.1.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งชุมชน

สิ่งเจือปนหลักในน้ำทิ้งชุมชนเป็นสารอินทรีย์มีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลาย และไม่ละลายลักษณะน้ำทิ้งแปรเปลี่ยนไปตามชนิดอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำทิ้งจากอาคารประเภทต่างๆ ของชุมชนในประเทศไทย (ไชยยุทธ ,2536)

ประเภทอาคาร	pH	TS (mg/l)	SS (mg/l)	BOD (mg/l)	TKN (mg/l)
สถานที่ราชการ	7.1-7.3 (7.2)	312-718(515)	25-28 (27)	8-27 (18)	13.9-17.08
อาคารชุด	7.1-7.6 (7.4)	596-712(658)	44-194 (95)	34-163 (123)	(24)
โรงแรม	7.0-7.8 (7.4)	494-534(513)	16-84 (42)	14-190 (75)	15.4-55 (27)
โรงพยาบาล	7.4-8.0 (7.6)	740-1020(880)	25-69 (52)	21-170 (84)	8.40-23.0(16)
อาบอบนวด	6.62	-	11.7	44.6	14.227.6(21)
ตลาด	6.5-6.7 (6.6)	1878-1973	242-551(386)	487-112 (710)	14.0
บ้านจัดสรร	7.4	(1925)	34	38	53.9-71.3
ร้านอาหาร	5.2-6.5 (6.0)	-	324-416(380)	919-2350	(654)
ศูนย์การค้า	7.51	2814-3670	61	(1503)	18.1
โรงเรียน	6.8-7.2 (7.0)	(3242)	58	81	55.1-84.5(71)
หอพัก	7.78	732	29	94-106 (100)	66.8
สะพานปลา	6.1	588	2260	75	24-34.3 (29)
		-		6000	19.2
		25022			32

หมายเหตุ : ( ) = ค่าเฉลี่ย

### 2.1.3 ปริมาณน้ำทิ้งชุมชน

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำทิ้งชุมชน ได้แก่

- มาตรฐานการครองชีพ กล่าวคือ ประชาชนที่มีรายได้สูงมักใช้ และผลิตน้ำทิ้งมากกว่าผู้มีรายได้ต่ำ เนื่องจากมักมีกิจกรรม อุปกรณ์อำนวยความสะดวกมาก เช่น เครื่องสุขภัณฑ์ รถยนต์ เป็นต้น
- ระบบน้ำประปา กล่าวคือ ในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีการบริการน้ำประปาอย่างสมบูรณ์จะทำให้การใช้น้ำ และการเกิดน้ำเสียมีอัตราสูงกว่าพื้นที่ซึ่งมีการบริการประปาไม่สมบูรณ์ เช่น น้ำประปาไหลบ้างชั่วโมงในหนึ่งวัน เป็นต้น
- การรณรงค์ให้มีการประหยัดการใช้น้ำ จะส่งผลให้อัตราการเกิดน้ำทิ้งมีค่าลดลง

ตามปกติ จากการสำรวจพบว่าอัตราการเกิดน้ำทิ้งจะมีค่าประมาณร้อยละ 70 – 80 ของปริมาณน้ำใช้ นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำเสียที่ระบายเข้าสู่ท่อระบายน้ำมีอัตราแตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นกับพฤติกรรมของชุมชนนั้นๆ เช่น ในกรุงเทพมหานคร ประชาชนส่วนใหญ่ใช้บ่อเกรอะ – บ่อซึมในการรองรับน้ำเสียจากส้วม ทำให้น้ำเสียที่ไหลลงท่อระบายน้ำมีอัตราต่ำกว่าในบางประเทศที่ระบายน้ำเสียจากส้วมเข้าสู่ท่อระบายโดยตรง เป็นต้น ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราน้ำเสียที่ได้มีการรวบรวมไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราน้ำเสีย และปริมาณบีโอดีจากอาคารในประเทศไทย (ธงชัย และคณะ, 2530)

แหล่งที่มา	หน่วย	อัตราน้ำเสีย (ลิตร/วัน -หน่วย)	ปริมาณบีโอดี (กรัม/วัน -หน่วย)
ภัตตาคาร	ตร.ม.	25	53
โรงแรม	เตียง	1,061	123
หมู่บ้านจัดสรร	คน	179	12.6
สำนักงาน	ตร.ม.	2.54	0.09
ห้างสรรพสินค้า	ตร.ม.	4.6	0.27
โรงพยาบาล	เตียง	800	94
ตลาด	ตร.ม.	69	21
หอพัก	ห้อง	78	76

## 2.2 แหล่งที่มาและผลกระทบของสารอินทรีย์และสารอาหารในแหล่งน้ำธรรมชาติ

### 2.2.1 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์และสารอาหาร

แหล่งที่มาของสารอินทรีย์และสารอาหารอาจกล่าวโดยสรุปว่า มาจากแหล่งใหญ่ๆ 2 แหล่งด้วยกันคือ

1. **แหล่งที่มาจากธรรมชาติ** เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ฝน และฝุ่นที่มีฟอสฟอรัสในอากาศให้ตกลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งน้ำฝนที่ตกลงมายังพื้นดิน พัดพาเศษซากดินและหินที่มีสารทั้ง 2 ชนิดนี้ลงในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลนก บางชนิด เศษซากพืชและสัตว์ที่ตายทับถมในแหล่งน้ำ ฯลฯ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแหล่งดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะควบคุมได้และอาจก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำบางแห่งได้

2. แหล่งที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนจากโรงงานอุตสาหกรรม และการเกษตรกรรม แม้ว่าจะมีการกำจัดน้ำทิ้งดังกล่าวนี้ แต่ยังคงเหลือสารอยู่เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามแหล่งนี้สามารถที่จะควบคุมให้มีปริมาณน้อยลงได้ง่ายกว่าแหล่งแรก (Callery และคณะ, 1977)

Rohlich (1960) รายงานว่า น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนที่ยังไม่ผ่านการกำจัดมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนประมาณ 21.9 – 32.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอินทรีย์ไนโตรเจนประมาณ 18.2 – 26.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 2.2.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์และสารอาหารที่มีต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

คุณภาพของแหล่งรับน้ำมีผลต่อการใช้ประโยชน์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การปล่อยน้ำเสียหรือของเสียลงไปในแหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งรับน้ำอย่างไร ขึ้นกับชนิด และปริมาณของน้ำเสียนั้นๆ

### 1. ผลกระทบของน้ำเสียที่มีความต้องการออกซิเจนต่อลำน้ำ

สารที่มีความต้องการออกซิเจนอาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เมื่อถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำแล้วทำให้ดีไอ (ออกซิเจนละลายน้ำ) ของแม่น้ำลดลงหากลดลงจนถึงจุดวิกฤต จะส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ เช่น กุ้ง ปลา เป็นต้น การลดลงของดีไอสามารถประมาณการได้หากมีข้อมูลเพียงพอ แม้ปริมาณออกซิเจนจะถูกใช้ไปในการย่อยสลายของเสีย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มเติมออกซิเจนจากบรรยากาศก็เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงดีไอจึงขึ้นกับการแข่งขันกันของกระบวนการดังกล่าว

### 2. ผลกระทบของสารอาหารต่อแหล่งน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดในกรณีที่แหล่งน้ำมีสารทั้ง 2 ชนิดนี้ มากจนเกินไปจะมีผลกระทบต่อแหล่งน้ำต่างๆ แต่เมื่อใดที่มีมากจนเกินไปก็จะทำให้เกิดปัญหาแก่แหล่งน้ำนั้น ซึ่งปัญหาที่พบเห็นโดยทั่วไปก็คือ การที่แหล่งน้ำนั้นมีการระบาดของพืชน้ำหลายชนิด เช่น สาหร่าย ผักตบชวา กก ฯลฯ ทำให้แหล่งน้ำนั้นเสื่อมโทรมลงในด้านคุณภาพ เช่น มีสีที่เปลี่ยนไป เกิดกลิ่นเหม็น เนื่องจากขาดออกซิเจน และมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ เรียกว่า “ยูโทรฟิเคชัน”

Dart และ Stretton (1977) พบว่า นอกจากสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นปัจจัยในการเกิดยูโทรฟิเคชันแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ร่วมอีกด้วย อาทิเช่น อุณหภูมิของน้ำ การเจริญ การหายใจ และการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ตลอดจนการละลายของออกซิเจนในน้ำ ฯลฯ

Callery และคณะ (1977) รายงานว่า ปัญหาที่ตามมาของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันนี้ นอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดมากขึ้นแล้วยังอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่อยู่ในสาหร่ายบางชนิด เช่น *Microcystis* และ *Anabaena* ได้เป็นต้น

สำหรับแหล่งน้ำที่มีแอมโมเนียอยู่ในปริมาณมาก อาจก่อให้เกิดพิษกับปลาและสัตว์น้ำโดยตรงอีกด้วย และส่งผลให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในแหล่งน้ำดังกล่าว เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันโดยเปลี่ยนแอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรต์และไนเตรต โดยที่แบคทีเรียไนตริไฟอิงซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีการใช้ออกซิเจนด้วย (McHarmess และคณะ, 1975)

## 2.3 การกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร

ระบบบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารจากน้ำเสียชุมชน ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่

### 2.3.1 กระบวนการบำบัดเบื้องต้น (Preliminary Treatment)

ประกอบด้วย ตะแกรงตกขยะ ถังดักทราย และ ถังปรับสมดุลย์ (Equalizing Tank) ซึ่งไม่ได้ช่วยลดความสกปรกในน้ำเสียโดยตรงแต่ช่วยลดความแปรปรวนของน้ำเสียที่ไหลเข้ามาซึ่งจะช่วยให้หน่วยบำบัดที่อยู่ถัดไปทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกรณีที่น้ำเสียไม่มีอัตราไหลที่แปรปรวนมากนักก็ไม่มีควมจำเป็นต้องมีถังปรับสมดุลย์ (ส่วนใหญ่ที่สร้างจริงก็ไม่มี)

### 2.3.2 กระบวนการบำบัดขั้นแรก (Primary Treatment)

เพื่อให้ น้ำเสียมีความเหมาะสมที่จะบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพต่อไปโดยการแยกสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็งออกจากน้ำ หน่วยบำบัดที่ให้ได้แก่ ถังตกตะกอนขั้นแรก (Primary Clarifier) หรือตะแกรงชนิดละเอียดซึ่งสามารถดักเศษวัสดุขนาด 1 – 2 มม. ได้

กระบวนการบำบัดขั้นแรกสามารถลดสารแขวนลอย และ บีโอดีได้ประมาณร้อยละ 50 และ 30 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวิศวกรหลายท่านได้จัดให้กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการบำบัดขั้นแรกด้วย

### 2.3.3 กระบวนการบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment)

เพื่อกำจัดค่าบีโอดีอาศัยกระบวนการแบบชีวภาพแบบใช้อากาศเป็นหลักซึ่งสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป ชนิดของระบบที่มีการนำไปใช้งาน เช่น

- . ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond)
- . ระบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon)
- . ระบบเอส (Activated Sludge)
- . ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter)
- . ระบบอาร์บีซี (RBC)

กระบวนการบำบัดขั้นที่สองถือว่ามีขีดความสามารถลดบีโอดีให้ไม่เกิน 20 มก./ล. และสามารถลดความสกปรกอื่นๆ ให้เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนดได้แล้ว

### 2.3.4 กระบวนการบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment)

กรณีที่ต้องการลดความสกปรกให้มากกว่านี้อาจทำได้โดยเพิ่มต่อด้วยกระบวนการขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) เช่น

#### 1. การกำจัดฟอสฟอรัส (phosphorus removal)

ได้แก่ การเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำอยู่ให้เป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอนแยกจากน้ำได้ สารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัส ได้แก่ สารอะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม (aluminum sulfate หรือ alum) และเฟอริกคลอไรด์ (ferric chloride)

## 2. การกำจัดไนโตรเจน (nitrogen removal)

ได้แก่ การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากแอมโมเนียให้เป็นไนเตรตในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และการเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นไนโตรเจนก๊าซในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) เป็นกรรมวิธีที่ใช้จุลินทรีย์จำเพาะชนิดเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ

## 3. การดูดติดผิวด้วยถ่าน (carbon absorption)

ได้แก่ การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและไม่ถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาทางชีวภาพ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี โดยการให้ถูกดูดไว้บนผิวของถ่านไวงาน (activated carbon) ซึ่งสามารถนำไปฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ได้ด้วยการเผาให้สารอินทรีย์ระเหยไป

## 4. การกรอง (filtration)

ได้แก่ การกำจัดปริมาณของแข็งจากน้ำทิ้งเพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพสูงนิยมใช้ชั้นของคาร์บอนและทรายขนาดเล็ก ในถึงลึกประมาณ 1 เมตร นิยมใช้สารสร้างตะกอน (coagulant) ช่วยให้องค์รวมตัวเป็นก้อนใหญ่ก่อนผ่านชั้นกรองเพื่อประสิทธิภาพ

## 5. การกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนพร้อมกัน (combined removal of phosphorus and nitrogen)

ได้แก่ การใช้ถังหรือ zone แบบไร้อากาศ กึ่งไร้อากาศ และให้อากาศ สลับกันเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจน มักจะเป็นกรรมวิธีสังวนลิขสิทธิ์ เช่น Berdenpho system, A<sup>2</sup>/O process, UCT process หรือ VIP process เป็นต้น

### 2.4 การกรอง (Filtration)

หลักการกำจัดสารแขวนลอยในชั้นกรองขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของสารแขวนลอย ตัวกลาง คุณลักษณะทางเคมีของน้ำและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ การกำจัดจะเกิดขึ้นภายในชั้นกรองและประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับกลไกการกรอง (O'Melia และ Stumm ,1969)

### 2.4.1 ทฤษฎีการกรอง

ระบบกรองน้ำแรกเริ่มเดิมทีถูกนำมาใช้ในงานประปาเท่านั้น ต่อมาในปี ค.ศ.1949 มีการนำเอา ระบบกรองน้ำมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดขั้นที่ 2 แล้ว(Effluent) โดยใช้กรองน้ำ ทิ้งที่เหลือออกจากถังตกตะกอนที่ 2 ทำให้น้ำทิ้งที่ออกมาไม่มีตะกอนแขวนลอยเหลืออยู่ สามารถลดค่า ของแข็งแขวนลอยและบีโอดีลงได้มาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ สามารถแยกตะกอนออกได้หมด หรือไม่สามารทำให้ น้ำทิ้งได้คุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด

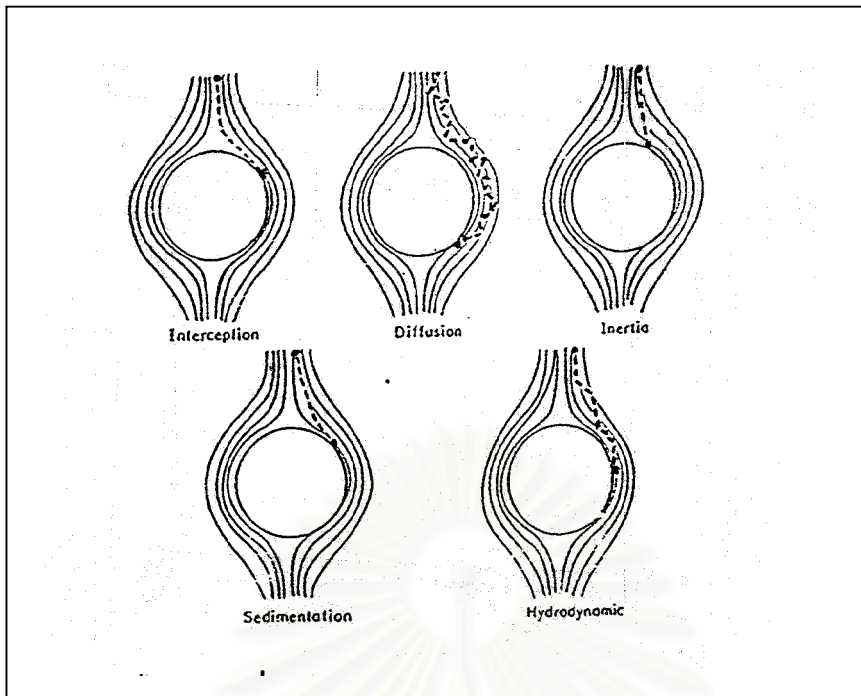
#### 1. กลไกของการกรองน้ำ ( เกรียงศักดิ์,2531 )

คือ วิธีการเคลื่อนที่ของตะกอนต่างๆในน้ำผ่านเข้าไปหาสารกรอง และวิธีการจับตะกอนต่างๆใน น้ำให้เกาะติดอยู่บนสารกรอง กลไกของการกรองน้ำมีอยู่ 3 กลไกด้วยกัน คือ

##### - กลไกทางกายภาพ ( รูปที่ 2.2 ) มี 4 แบบ คือ

1. การติดค้างอยู่บนสารกรอง (Straining) คือ การติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ขนาดของตะกอนใหญ่กว่าช่องว่างสารกรองและแบบที่มีขนาดของตะกอนเล็ก กว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง
2. การตกตะกอน ( Sedimentation ) คือ ตะกอนได้ตกลงบนสารกรองภายในชั้นกรอง
3. การเบียดเข้าหาสารกรอง ( Interception ) คือ ตะกอนได้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับ กระแสน้ำ และตะกอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพบกับผิวของสารกรอง
4. Inertial Impact คือ ตะกอนที่มีน้ำหนักมากเกินไปจนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับ กระแสน้ำ ดังนั้นตะกอนหนักเหล่านี้จะตกลงบนสารกรองเสียก่อน





รูปที่ 2.2 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Ives , 1970)

- กลไกทางกายภาพและเคมี

กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทั้งทางกายภาพและเคมี ดังรูปที่ 2.3 จะมีการทำงานได้ดีกว่า กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เพราะการกรองนี้เกิดขึ้นได้เกือบทั่วทั้งชั้นกรอง ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้สารกรองมีมาก กลไกของการกรองน้ำแบบนี้ต้องอาศัยหลักฟิสิกส์มาอธิบาย โดยสามารถแบ่งออกได้ 4 แบบ ดังนี้

1. การดูดติดผิวทางเคมี ( Chemical adsorption )

คือ การดูดติดผิวที่อาศัยการยึดเหนี่ยวทางเคมี โดยจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในการดูดติดผิวระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง เพราะตามที่เคยเข้าใจว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2. การดูดติดผิวทางกายภาพ ( Physical adsorption )

คือ การดูดติดผิวที่อาศัยแรงต่างๆยึดเหนี่ยวไม่ให้เกิดหลุดออกจากกันระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการดูดติดผิวทางเคมี

สำหรับการดูดติดผิวทางกายภาพจะประกอบด้วยแรง 3 ลักษณะ ได้แก่ Electrostatic forces , Electrokinetic forces และ Van der Waals forces

-Electrostatic forces คือ แรงที่เกิดขึ้นกับตะกอนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นบนสนามไฟฟ้าสถิต บริเวณสารกรอง

-Electrokinetic forces คือ แรงที่เกิดขึ้นกับตะกอนที่มีประจุไฟฟ้า โดยตะกอนนี้จะเคลื่อนที่บน สารกรองอยู่ตลอดเวลา

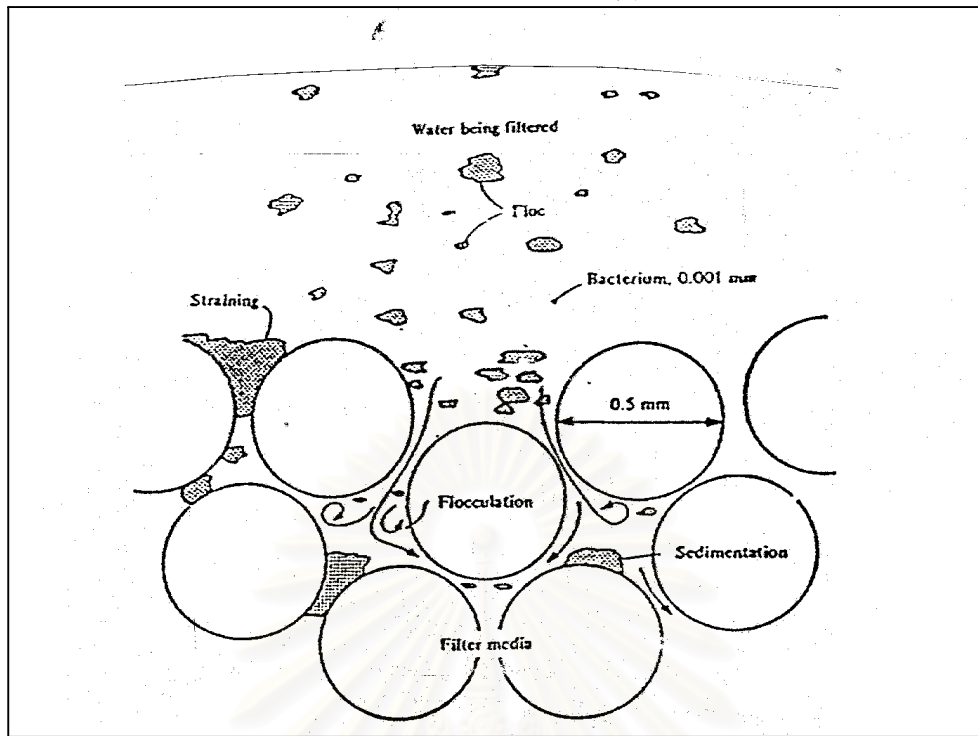
-Van der Waals forces คือ แรงดึงดูดระหว่างตะกอนกับสารกรอง ซึ่งจะไม่เกาะติดบนผิวที่หนึ่งที่ใดโดยเฉพาะแต่จะเกาะติดบนผิวโดยที่มีการเคลื่อนที่แบบอิสระอยู่ตลอดเวลา (translational movement) แต่ต้องอยู่ในขอบเขตของวัตถุทั้งสอง

### 3. แรงติดแน่น ( Adhesion forces )

คือ แรงติดแน่นให้ตะกอนประเภท Flocculant ติดแน่นกับผิวของสารกรองที่ตะกอนนี้ไหลผ่านมา พบ แต่เนื่องจากแรงเสียดน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านชั้นกรอง ได้เกาะพวกตะกอนบางส่วนก่อนที่ ตะกอนส่วนนี้จะเกาะติดแน่นบนผิวสารกรอง ซึ่งทำให้น้ำได้ไหลพาตะกอนนี้เคลื่อนผ่านชั้นกรองลงไปลึก ขึ้น จนอาจหลุดออกจากชั้นกรอง และไหลไปปนกับน้ำที่ผ่านระบบกรองน้ำแล้วซึ่งมีผลทำให้ effluent มี ปริมาณตะกอนมากขึ้น

### 4. Coagulation-Flocculation

คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้ตะกอนต่างๆในน้ำได้มีโอกาสเกาะตัวซึ่งกันและกัน ทำให้ ตะกอนเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะมีผลให้เกิดการดักตะกอนโดยสารกรองในชั้นกรองได้ ซึ่งจะอาศัยกลไกของการกรองน้ำแบบต่างๆ ได้แก่ Straining , Sedimentation , Interception , Inertial impaction และ Adhesion forces



รูปที่ 2.3 กลไกการจับสารแขวนลอย (มันสิน, 2527)

- กลไกทางชีวเคมี

กลไกของการกรองน้ำที่เกิดจากทางชีวเคมี คือ พวกจุลินทรีย์ต่างๆ ได้เติบโตอยู่ภายในชั้นกรอง ซึ่งจะลดขนาดของช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรอง และทำให้เกิดการดักตะกอนโดยสารกรองในชั้นกรองได้ ซึ่งจะอาศัยกลไกของการกรองน้ำแบบต่างๆ ได้แก่ Straining , Sedimentation , Interception , Inertial impaction และ Adhesion forces

## 2.4.2 ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบการกรอง

### 1. คุณภาพน้ำ

ลักษณะสมบัติของน้ำดิบที่เข้าเครื่องกรองเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดชนิดของชั้นกรอง

Baumann (1983) กล่าวว่าวิธีการกรองตรงสามารถใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่น 50 – 60 เอ็นทียู ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

Metcalf และ Eddy (1991) กล่าวว่า น้ำดิบที่มีความขุ่นไม่เกิน 7 – 9 เอ็นทียู หรือมีของแข็งแขวนลอยประมาณ 16 – 23 มก./ล. สามารถใช้วิธีการกรองตรงแบบไม่เติมสารเคมีได้ น้ำออกที่ผลิตได้จะมี

ความขุ่นไม่เกิน 2 เอ็นทียู แต่ถ้าน้ำดิบมีความขุ่นมากกว่า 7 – 9 เอ็นทียู ควรเติมสารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าเครื่องกรอง

## 2. สารกรอง

การเลือกสารกรองเป็นขั้นตอนแรกที่ต้องทำในการออกแบบ ประกอบด้วย การกำหนดขนาดและความหนาของสารกรอง เพื่อให้สามารถผลิตน้ำได้ตามคุณภาพที่ต้องการ มีระยะเวลาการกรองนานสามารถกรองน้ำได้ในอัตราสูง เกิดการสูญเสียความดันน้อย และทำความสะอาดได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้น้ำหรืออากาศมากนัก

Vigneswaren, Tam และคณะ (1963) กล่าวว่า ชนิดของสารกรองที่นิยมใช้กันมากในกรองน้ำได้แก่

- ททราย (Silica Sand) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65
- ถ่านแอนทราไซต์ (Anthracite Coal) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.35 – 1.75
- ททรายกาเน็ท (Garnet Sand) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4 – 4.2

การเลือกชนิดของสารประกอบจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะสมบัติของน้ำเข้าและคุณภาพของน้ำออกที่ต้องการ การเลือกใช้สารกรองที่มีขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการกรองสูงและมีรูพรุนเล็ก ทำให้กรองน้ำได้ดี การกรองแบบธรรมดา มักจะใช้ทรายที่มีขนาดสัมฤทธิ์ 0.6 มิลลิเมตร และมีค่าประสิทธิภาพสม่าเสมอประมาณ 1.5 – 2.0 แต่การเลือกใช้สารกรองดังกล่าวมีข้อเสียคือ ภายหลังจากการล้างย้อนเม็ดทรายในลักษณะดังกล่าว สามารถแก้ไขได้โดยการใช้เครื่องกรองแบบสองชั้นกรอง (Dual Media Filter) หรือเครื่องกรองแบบหลายชั้นกรอง (Multi-media Filter) หรือเครื่องกรองแบบชั้นกรองเดี่ยวที่ใช้สารกรองขนาดใหญ่ (Coarse Media Filter)

เครื่องกรองที่เหมาะสมสำหรับใช้กรองน้ำเสีย ควรจะเป็นเครื่องกรองแบบชั้นกรองเดี่ยวที่ใช้ทรายหรือถ่านแอนทราไซต์เป็นสารกรอง ส่วนเครื่องกรองแบบสองชั้นก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือมักเกิดการสะสมของสไลด์จ์ที่รอยต่อระหว่างผิวหน้าของชั้นทรายและชั้นถ่านซึ่งทำความสะอาดค่อนข้างยาก ต้องใช้ลมช่วยเป่าเพื่อทำความสะอาดชั้นกรอง

### 3. อัตราการไหลของน้ำ

โดยทั่วไปอัตราการไหลยิ่งต่ำประสิทธิภาพของเครื่องกรองจะยิ่งสูงแต่จะผลิตน้ำได้น้อยและช้า อย่างไรก็ตามอัตราการไหลมิได้เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดเครื่องกรองที่มีอัตราการกรองสูงก็สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพดีได้ถ้ามีการเตรียมน้ำก่อนกรองที่ดี

**ปรีชา (2531)** ทำการทดลองระบบกรองโดยตรงกับน้ำที่มีความขุ่น 10 เอนทิยู ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราการกรอง 10 ลบ.ม/ตร.ม-ชม. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่แปรปรวนอย่างกะทันหันเป็นต้นเหตุที่ทำให้คุณภาพน้ำลดต่ำได้มาก ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนิยามรักษาระดับของอัตราการกรองให้คงที่อยู่ตลอดเวลาด้วยอุปกรณ์ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันพบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรักษาอัตราการไหลของน้ำให้คงที่เสมอไป **มันสิน (2530)** กล่าวว่า การกรองในอัตราที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอและมีแบบแผน (Declining rate filtration) สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูงได้เช่นกัน และยังอาจผลิตน้ำได้มากกว่าด้วย

### 4. การล้างย้อน

มีความสำคัญต่อการกรองน้ำเนื่องจากเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมรรถนะของเครื่องกรอง เครื่องกรองที่ล้างไม่พอเพียงทำให้มีการสะสมของสารแขวนลอยและสิ่งสกปรกอื่นๆ จะไม่สามารถผลิตน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจัยที่ทำให้สิ่งสกปรกซึ่งค้างอยู่ในช่องว่างของชั้นกรองหรือเกาะอยู่บนเม็ดสารกรองหลุดออกมามี 2 ปัจจัยคือ แรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำและการขัดสีระหว่างเม็ดสารกรอง

**Amirtharajah (1978)** วิเคราะห์พบว่า ในกรณีที่ใช้ทรายเป็นสารกรองการล้างย้อนจะได้ผลดีที่สุด เมื่อชั้นทรายขยายตัวจนมีความพรุนเท่ากับ 0.7 หรือระดับการขยายตัวเท่ากับ 30-40%

#### 2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกรอง ดังนี้

##### 1. ข้อดี คือ

- สามารถลดขนาดทางกายภาพที่ต้องใช้ในระบบลงไปได้
- สามารถลดปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ลงได้เพราะไม่จำเป็นต้องให้กลุ่มตะกอนมีขนาดใหญ่เพื่อตกตะกอนได้ง่าย

- การกรองด้วยตัวกลางชนิดเดียวสามารถใช้ประโยชน์ได้ตลอดความลึกของตัวกลางสำหรับเก็บกักสิ่งสกปรกที่กำลังจะออกไป
- สำหรับตัวกลางชนิดเดียวการดูแลรักษาสำหรับการล้างย้อนทำได้ง่ายกว่า
- ค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบถูกกว่าวิธีอื่นๆ

## 2. ข้อเสีย คือ

- ช่วงเวลาการกรองสั้น เนื่องจากสารแขวนลอยจะเข้าไปตกค้างอยู่ในสารกรองทำให้ต้องเพิ่มความถี่และระยะเวลาในการล้างย้อนมากขึ้น
- น้ำเสียที่เข้าระบบต้องมีค่าสารแขวนลอยไม่สูงมากนัก

## 2.5 คอนกรีต

คอนกรีตจัดเป็นวัสดุก่อสร้างหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เป็นหินเทียมที่มนุษย์ได้ค้นคิดประดิษฐ์ขึ้นเพื่อให้แทนหินธรรมชาติ

### 2.5.1 องค์ประกอบของคอนกรีต

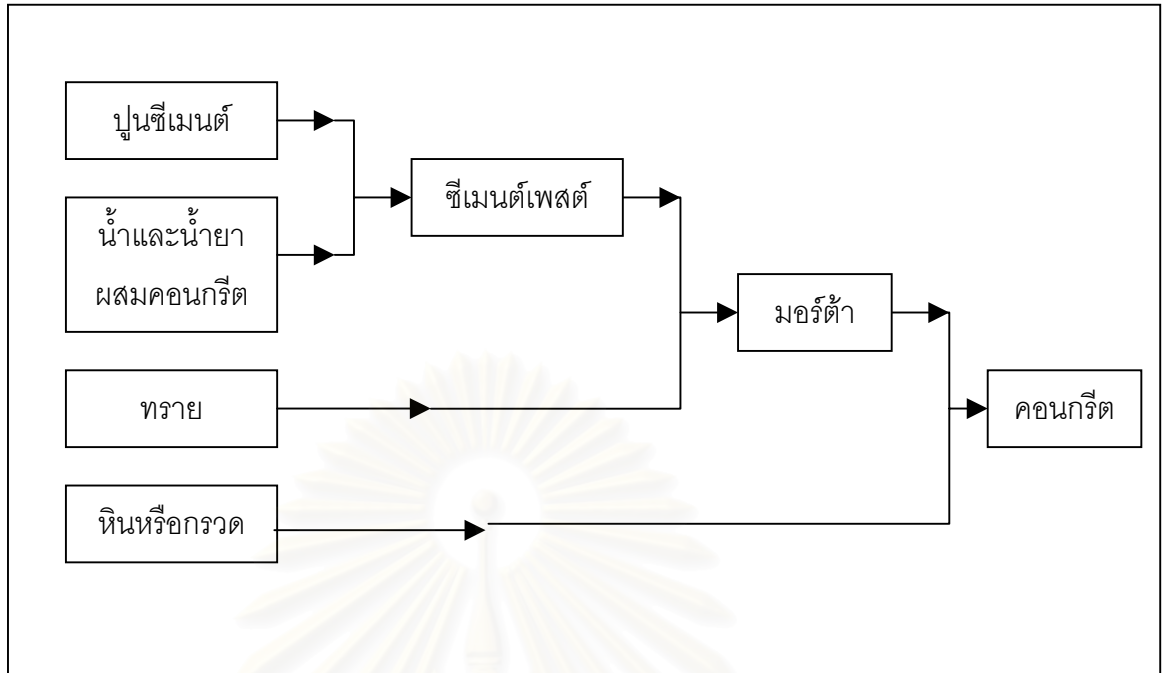
คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ททราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ททราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)

มอร์ต้า ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete) ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆ ของคอนกรีต (ชัชวาลย์ ,2537)

คอนกรีตที่ดี จะเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของวัสดุผสมแต่ละทุกๆ อนุภาคในส่วนผสม ถูกเคลือบหรือหุ้มไว้ด้วยซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำและอากาศ และช่องว่าง (Void) ระหว่างอนุภาคต่างๆ ได้ถูกแทนที่ด้วยซีเมนต์เพสต์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นคุณภาพของคอนกรีต จึงขึ้นอยู่กับกำลังของซีเมนต์เพสต์เป็นสำคัญ นอกเหนือไปจากความแข็งแรงของวัสดุ ผสมคละที่ใช้

### 1. ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ เป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างกัน จะทำให้คุณสมบัติจับเกาะแน่นกับวัสดุผสม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นสำคัญ นอกจากนั้นสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมอันได้แก่ความชื้น และอุณหภูมิและเวลา ก็เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ด้วยเช่นกัน ปกติปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกและจะช้าลงตามลำดับในภายหลัง ซีเมนต์ที่ดีจะต้องมีความชื้นเหลือที่พอดีเพื่อสะดวกต่อการเทคอนกรีต แต่ก็จะต้องไม่เหลวจนเกินไป เพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง





ช่องว่าง (void) ระหว่างกันน้อย อันจะเป็นผลทำให้สิ้นเปลืองซีเมนต์เพสต์น้อยลงและช่วยให้คอนกรีตมีราคาถูกลง นอกจากนั้นยังจะต้องสะอาดปราศจากสารที่จะทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพอีกด้วย

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะต้องมีความแข็งแรงและมีกำลังไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอตลอดทั้งแท่ง น้ำซึมผ่านไม่ได้ มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและต่อลมฟ้าอากาศได้ดี ไม่หดตัวมากจนเกินไปเมื่อลมฟ้าอากาศหรืออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ต้องการจะให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเฉพาะอย่างเช่น คอนกรีตพูน ซึ่งจะต้องมีการใส่สารเติมคอนกรีตลงไป

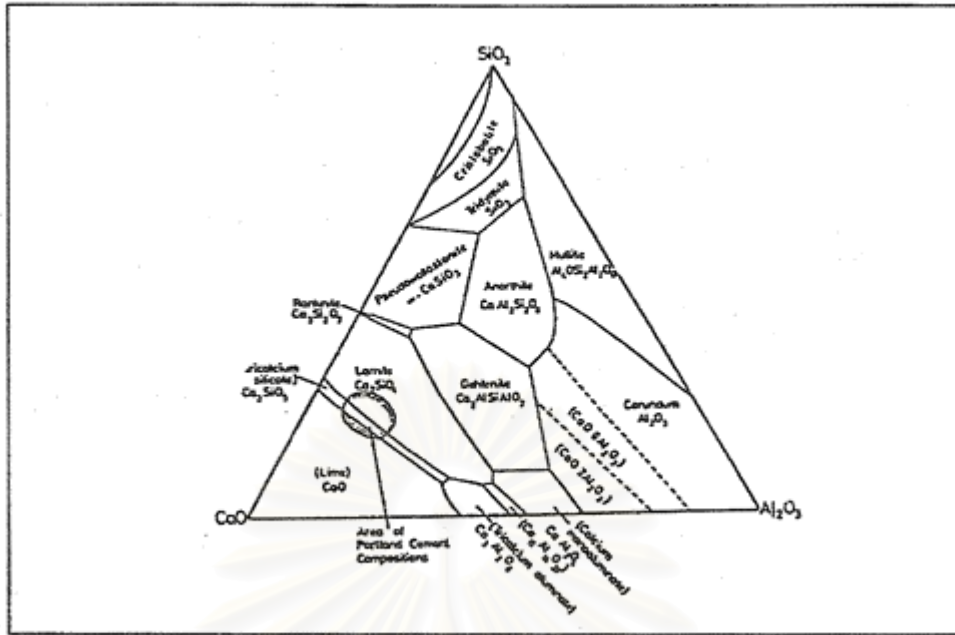
## 2.5.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ อันได้แก่ หินปูน (Limestone) หรือ ดินปูนขาว (Marl) กับดินเหนียว (Clay) หรือหินดาน (Shale) ในสัดส่วนที่ถูกต้องเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิต อาจมีการเติม แร่เหล็ก (Iron ore) หรือ ยิปซัม (Gypsum) ตามความจำเป็น เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับวัสดุผสมคละจำพวกหินย่อยหรือกรวด กับทรายหยาบ และน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะ ก็จะกลายเป็น คอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วก็จะมี ความแข็งแรงและความทนทานคล้ายหิน จึงนิยมนำไปใช้กันมากกับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ หรือเมื่อผสมกับทรายกับปูนขาว ก็จะกลายเป็น ปูนก่อ หรือ ปูนฉาบ ที่ใช้กับงานก่ออิฐ หรือก่อคอนกรีตบล็อก และ ฉาบปูน ปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

### 1. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

เป็นสารประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอลูมิเนตเป็นส่วนสำคัญซึ่งได้จากการเผา วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในสัดส่วนที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นปูนเม็ด (Clinker) รูปที่ 2.7 ที่มีสารประกอบจำพวกต่างๆ ดังนี้

1. ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ซึ่งมีสูตรเคมี 2 CaO.SiO<sub>2</sub> เรียกชื่อย่อว่า C<sub>2</sub>S
2. ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ซึ่งมีสูตรเคมี 3 CaO.SiO<sub>2</sub> เรียกชื่อย่อว่า C<sub>3</sub>S
3. ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) ซึ่งมีสูตรเคมี 3 CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เรียกชื่อย่อว่า C<sub>3</sub>A
4. เทตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ซึ่งมีสูตรเคมี 4CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เรียกชื่อย่อว่า C<sub>4</sub>AF



รูปที่ 2.7 การจำแนกส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ (จิตติมา, 2541)

โดยทั่วไปการผลิตปูนเม็ด (Clinder) 1 ตัน จะใช้วัตถุดิบรวม 1.64 ตัน โดยมีอัตราส่วนดังนี้ หินปูน 1.28 ตัน (ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์) ดินเหนียว 0.16 ตัน หินดินดาน 0.16 ตัน (รวมกันประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์) และแร่เหล็ก 0.04 ตัน (ประมาณ 1 – 2 เปอร์เซ็นต์)

### 2.5.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. วัตถุดิบที่ให้พวก CaO (lime component) ได้แก่ หินปูน (limestone) ชอล์ค (Chalk) และดินมาร์ล (Marl) โดยทั่วไปหินปูนเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ เพราะจำเป็นต้องใช้ในสัดส่วนที่มากกว่าวัตถุดิบอื่น หินปูนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ควรมีส่วนประกอบของ CaCO<sub>3</sub> อยู่ระหว่าง 85 – 92 เปอร์เซ็นต์

2. วัตถุดิบที่ให้พวก SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Clay component) ได้แก่ หินดินดาน (Shale) หินภูเขาไฟ และดินเหนียว (Clay) หินดินดานเป็นวัตถุดิบหลักที่สองของส่วนผสม มักประกอบด้วยแร่ดินต่างๆ คือ แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) แร่ิลไลต์ (illite) และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในรูปของอลูมิเนียม ซิลิเกตที่มีผลึกน้ำ (Hydrocus Aluminosilicates) มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หินดินดานคุณภาพดีที่ต้องการใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ควรมีค่า Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ระหว่าง 10 – 30 เปอร์เซ็นต์ SiO<sub>2</sub> อยู่ระหว่าง 40 – 60 เปอร์เซ็นต์ และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ระหว่าง 5 – 10 เปอร์เซ็นต์

3. **วัตถุดิบที่ใช้สำหรับแต่งส่วนผสม (Corrective material)** เป็นวัตถุดิบประเภทใช้เติมในส่วนผสมของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น หินปูนคุณภาพสูง (เมื่อขาด CaO) ททรายเมื่อขาด (SiO<sub>2</sub>) แร่บ็อกไซต์ (เมื่อขาด Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และแร่เหล็ก (เมื่อขาด Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

4. **วัตถุดิบที่ใช้เป็นสารเติม (Additives)** คือ สารที่ใส่เข้าไปเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ เช่น ผสมแร่ยับยั้งในการบดปดเม็ดเพื่อทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าลง (retarder)

#### 2.5.4 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

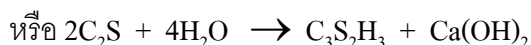
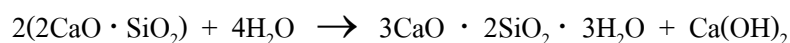
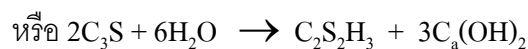
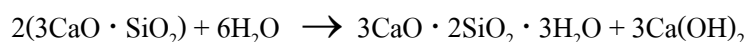
1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

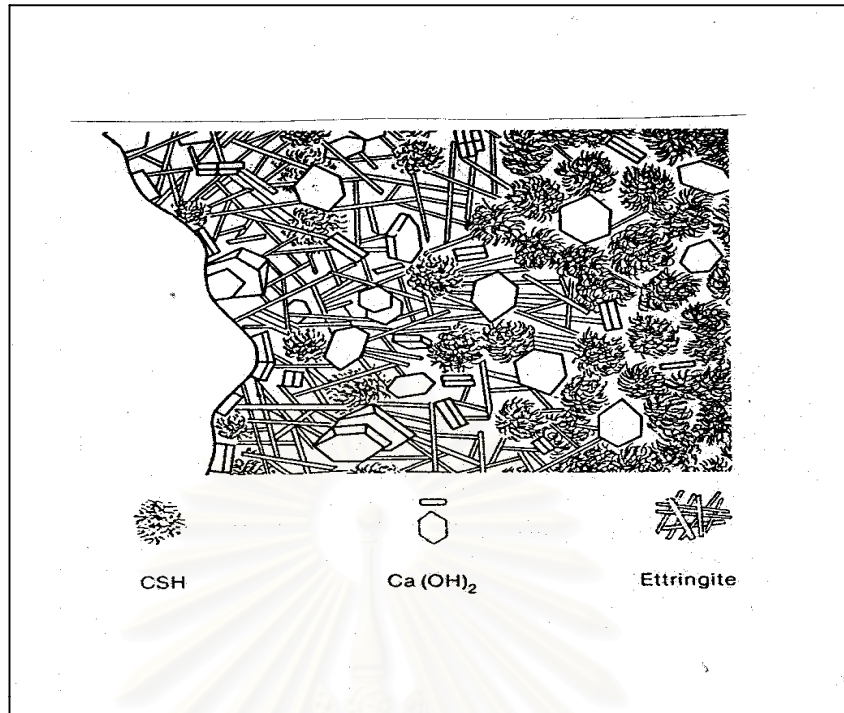
2) การเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

##### 1. ปฏิกริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกริยากับน้ำ ก่อให้เกิด Ca(OH)<sub>2</sub> และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการการเกิดปฏิกริยามีดังนี้





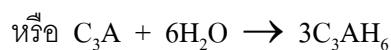
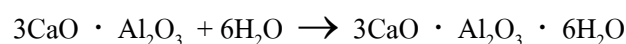
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต (ซ้ชวาลัย,2537)

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

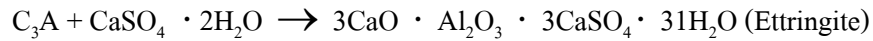
$\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

## 2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )

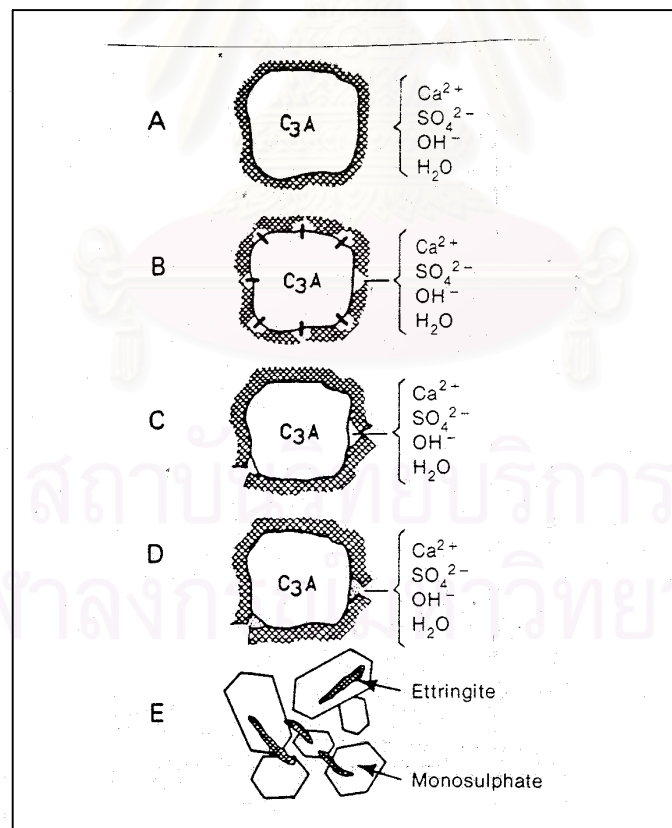
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



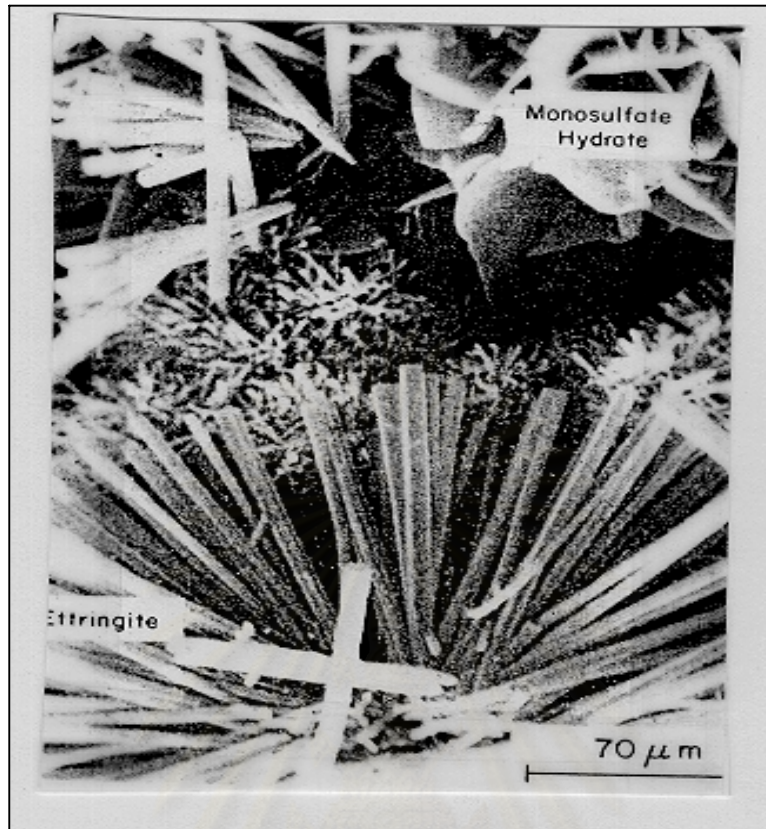
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $\text{C}_3\text{A}$  ดังสมการ



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $\text{C}_3\text{A}$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้ามาไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



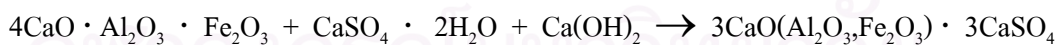
รูปที่ 2.9 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  (ชัชวาลย์, 2537)



รูปที่ 2.10 ขยาย Monosulphate และ Ettringite (ชัชวาลย์,2537)

### 3. ปฏิริยาไฮเดรชันของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

ปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิริยากับยิบซัม และ  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



#### 2.5.5 วัสดุผสมและน้ำ

1. **วัสดุผสม (Aggregates)** หรือบางที่เรียกว่า มวลรวม จัดเป็นหนึ่งในวัสดุสำคัญที่ใช้งานปูนคอนกรีต โดยทั่วไปได้แก่ หินย่อย กรวดและทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมเข้ากับปูนซีเมนต์แล้วไม่เพียงแต่จะทำให้คอนกรีตมีขนาด รูปร่างและความแข็งแรงตามต้องการเท่านั้น แต่ก็จะยังช่วยทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงอีกด้วย

วัสดุผสมที่นิยมใช้กับงานปูน – คอนกรีต จำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- วัสดุผสมละเอียด (Fine Aggregates)

วัสดุผสมละเอียด หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (ช่องขนาด 4.76 มม.) ได้ และอาจมีบางส่วนที่หยาบกว่าผสมอยู่บ้าง แต่จะต้องไม่เกินปริมาณที่กำหนด อย่างไรก็ตาม วัสดุผสมชนิดนี้จะต้องไม่เล็กเกินไปจนกลายเป็นฝุ่น วัสดุละเอียดในที่นี้ได้แก่ ทรายซึ่งมีทั้ง ทรายปากรธรรมชาติ และทรายที่ทำขึ้น ทรายที่เหมาะสมกับงานคอนกรีตจะต้องมีความแข็ง มีเหลี่ยมคมและมีขนาดของเม็ดที่สม่ำเสมอ ทรายหยาบที่มีขนาดเม็ดทรายตั้งแต่ประมาณ 2 ถึง 4.5 มิลลิเมตร สำหรับทราย กลาง ที่มีขนาดของเม็ดทรายตั้งแต่ประมาณ 1 ถึง 3 มิลลิเมตร นั้น ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานปูนก่อน ส่วนทรายละเอียด ที่มีขนาดของเม็ดทรายตั้งแต่ประมาณ 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตร มักจะถูกนำไปใช้กับงาน ปูนฉาบหรือใช้ในการผสมเพื่อตกแต่งผิวหน้าหรือตกแต่งภายในอื่นๆ ก่อนนำทรายไปใช้ทุกครั้งจะต้องร่อน ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่กำหนด เพื่อให้ได้เม็ดทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอกัน นอกจากนี้ยังเป็นการแยก อินทรีย์วัตถุต่างๆ ให้ออกไปจากทราย

- วัสดุผสมหยาบ (Coarse Aggregates)

วัสดุผสมหยาบ หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่จะค้างอยู่บนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และ อาจมีบางส่วนที่ละเอียดกว่าผสมอยู่บ้างแต่จะต้องไม่เกินปริมาณที่กำหนด วัสดุผสมชนิดนี้ได้แก่หินย่อย หรือกรวด (gravel) หรือวัสดุผสมชนิดอื่นที่เหมาะสมแทนก็ได้ หินที่เหมาะสมแทนก็ได้ หินที่เหมาะสมต่อการ ทำคอนกรีตมากที่สุด จะต้องคม แกร่ง แข็ง มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ มีผิวขรุขระ ยึดติดตัวดี และทนทานต่อ การสึกหรอได้ดี หินที่นำมาใช้จะต้องสะอาดไม่มีเศษวัชพืชหรือสิ่งอื่นใดเจือปน และจะต้องมีขนาดคละกัน กล่าวคือจะต้องมีขนาดของก้อนลดหลั่นกัน ก้อนใหญ่สุดมักจะมีขนาดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ขนาด ของหินที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่ 4.76 ถึง 76.20 มิลลิเมตร (3/16 ถึง 3 นิ้ว) ดังรูปที่ หิน ย่อยเบอร์ 1 จะมีขนาดตั้งแต่ 4.76 ถึง 19.05 มิลลิเมตร (3/16 ถึง 3/4 นิ้ว) ส่วนหินย่อยเบอร์ 2 จะมีขนาด ตั้งแต่ 19.05 ถึง 38.01 มิลลิเมตร (3/4 ถึง 1 1/2 นิ้ว) โดยที่หินย่อยเบอร์ 3 จะมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 38.01 ถึง 76.20 มิลลิเมตร (1 1/2 ถึง 3 นิ้ว) สำหรับหินที่มีขนาดก้อนโตกว่านี้ ไม่นิยมนำมาใช้ในการทำคอนกรีต

วัสดุผสมที่นำมาใช้กับงานปูน-คอนกรีตจะต้องแกร่ง แข็ง และทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ มีรูพรุนพอที่จะสามารถดูดซับน้ำและเป็นที่ยึดเหนี่ยวให้ น้ำ ขยายตัวได้ มีรูปร่างเป็นแฉกเหลี่ยมคมที่เหมาะสม มีความลดหลั่นของขนาดตามเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อให้ สามารถเรียงตัวกันได้แน่น และไม่ทำปฏิกิริยากันปูนซีเมนต์ เพื่อที่จะสามารถช่วยประหยัดปูนซีเมนต์ลงได้

และทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงที่ถูกต้อง นอกจากนี้วัสดุผสมเหล่านี้ก็ต้องสะอาด ปราศจาก ผุ่น ดิน สิ่งสกปรก และอินทรีย์วัตถุเจือปน เนื่องจากสิ่งเหล่านี้จะทำให้การประสานยึดระหว่างวัสดุผสมต้องสูญเสียไป อันจะเป็นผลทำให้คอนกรีตเสียความแข็งแรงไปในที่สุด

2. **น้ำ** น้ำจัดเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญต่องานปูน-คอนกรีตโดยทั่วไป เพราะนอกจากจะต้องใช้น้ำเพื่อการผสมปูนหรือผสมคอนกรีตแล้ว ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำ เพื่อล้างวัสดุผสมและบ่มคอนกรีตอีกด้วย

### 2.5.6 ปูนขาวและสารเติมคอนกรีต

1. **ปูนขาว (Lime)** จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง นิยมใช้กันโดยทั่วไปกับงานก่ออิฐ ถือปูน อาทิเช่น การใส่ปูนขาวผสมเข้ากับทรายทำเป็นปูนก่อหรือปูนฉาบ แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นงานก่ออิฐถือปูนก็ต้องรับน้ำหนักมาก ๆ ก็จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมลงไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถที่จะใช้ปูนขาวผสมทำสีน้ำปูน (White wash) สำหรับใช้ทากำแพงหรือทาอาคารได้ ใช้โรยได้ อาคารเพื่อป้องกันปลวกได้ในด้านการเกษตรนิยมใช้ปูนขาวผสมกับดินเพื่อแก้ความเป็นกรดได้อีกด้วย

ปูนขาวโดยทั่วไปได้มาจากการเผาหินปูน (Limestone) โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 1,400 ถึง 2,000 องศาฟาเรนไฮต์ (760 ถึง 1,093 °ซ.) ในการเผาจะใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิ และเมื่อเผาสุกดีแล้วจึงนำไปบดให้เป็นผง ปูนขาวที่ดีจะต้องเผาสุก เนื้อปูนแห้งสนิท มีสีขาว และละลายน้ำได้ดี

2. **สารเติมคอนกรีต (Concrete Admixture)** หรือที่นิยมเรียกกันอย่างหนึ่งว่า สารเคมีผสมเพิ่ม จัดเป็นสารที่ใช้สำหรับเติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ได้ตามต้องการ สารชนิดนี้สามารถที่จะใช้เติมก่อนที่จะทำการผสม หรือใช้เติมในระหว่างทำการผสมส่วนผสมของคอนกรีตก็ได้

สารเติมคอนกรีตมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กับวงการก่อสร้างในปัจจุบัน ได้แก่

- **สารเร่งการก่อตัว (Rapid-setting Agent)** วัตถุประสงค์ของการใช้สารชนิดนี้ก็คือ เพื่อให้ถอดแบบได้เร็วจะได้สามารถนำแบบไปใช้กับงานอื่นๆ ได้ หรือใช้ในกรณีที่ต้องการให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงในระยะเวลาสูงเร็วกว่าปกติ อาทิเช่น งานหล่อเสาเข็ม หรือเสาไฟฟ้าเพื่อการค้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังเหมาะที่จะนำไปใช้กับงานซ่อมคอนกรีต อาทิเช่น ใช้อุดรูร้าวในเนื้อคอนกรีต หรืออัดเพื่อประสานรอยต่อระหว่างคอนกรีต เป็นต้น



สารที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งได้แก่ โซเดียมซิลิเกต และไตรเอทอะโนลาไมน์ สารชนิดนี้จะเร่งให้คอนกรีตมีกำลังสูงในระยะแรกได้ดี แต่ในระยะหลังจะทำให้คอนกรีตที่ใช้สารชนิดนี้มีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตแบบธรรมดา สารชนิดนี้มีคุณสมบัติในการเพิ่มความหดตัวในคอนกรีตขณะแข็งตัว จึงอาจจะทำให้เกิดร้าวในคอนกรีตได้

- สารหน่วงการก่อตัว (Slow-setting Agent) สารชนิดนี้จะช่วยให้คอนกรีตก่อตัวได้ช้ากว่าปกติ ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์บางประการ อาทิเช่น ช่วยยืดระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตเพื่อสามารถเทและตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตได้ทันเวลา จึงสามารถช่วงลดรอยต่อในการเทได้ เช่นในกรณีที่ต้องการเทอย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังสามารถช่วยลดการแตกร้าวในคอนกรีตขณะแข็งตัวได้อีกด้วย สารชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติในทางลดปริมาณน้ำได้ด้วย มีทั้งแบบผงและแบบน้ำ ทำจากกรดลิกโนซัลโฟนิค หรือเกลือ และเกลือไฮดรอกซีเลตคาร์โบซิลิก ซึ่งบางชนิดอาจจะผสมสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์อื่นๆ ร่วมอยู่ด้วย

ในการใช้สารชนิดนี้ ปกติจะใช้ไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ใช้ และในการใช้ก็จะต้องควบคุมให้ดี เพราะถ้าใช้มากเกินไปก็ทำให้เกิดการหน่วงงานก่อนตัวของคอนกรีตมากเกินไปหรืออาจจะทำให้ไม่เกิดการก่อตัวเลยก็ได้ โดยทั่วไปเมื่อใช้สารชนิดนี้แล้ว จะทำให้กำลังของคอนกรีตในระยะ 3 วันแรกลดต่ำลง แต่เนื่องจากสารชนิดนี้มีคุณสมบัติช่วยลดปริมาณของน้ำได้ด้วย ปกติจะช่วยลดได้ประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ จึงช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในระยะหลังได้ โดยทั่วไปจะสูงกว่าคอนกรีตแบบธรรมดาประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีอายุครบ 28 วัน

- สารทำให้เกิดฟองอากาศ (Air-entraining Agent) สารชนิดนี้เมื่อเติมลงไปคอนกรีต ก็จะทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ขนาด 0.007 ถึง 0.025 มิลลิเมตร จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปโดยไม่ติดต่อกันในเนื้อของคอนกรีต สารชนิดนี้จะช่วยลดการแตกร้าวของคอนกรีตที่เกิดจากน้ำในเนื้อของคอนกรีตที่ยังมิได้ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เกิดการแข็งตัว และขยายตัวดันเนื้อคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวในขณะที่อุณหภูมิต่ำ เพราะฟองอากาศที่เกิดจากการใช้สารชนิดนี้ จะทำหน้าที่เสมือนกับอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กๆ ที่จะใช้รองรับน้ำดังกล่าว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอากาศที่ถูกอัดตัวอยู่ในฟองดังกล่าว ก็จะดันน้ำให้กลับออกมาที่เดิม นอกจากนั้นฟองอากาศที่เกิดขึ้น ยังสามารถที่จะช่วยลดความเค้นระหว่างมวล และช่วยให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความยืดหยุ่นตัว ช่วยให้ทำงานได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องเติมน้ำเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม ซึ่งจะเป็นผลทำให้คอนกรีตเสียกำลัง ดังนั้นการใช้สารชนิดนี้ จึงช่วยทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น

นอกจากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สารชนิดนี้ยังสามารถช่วยลดการแยกตัว และการสูญเสีย น้ำของคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นสม่ำเสมอไม่ร้าวซึมและมีความต้านทานต่อ ซัลเฟตสูงขึ้น

สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศมีหลายชนิด มีทั้งชนิดที่ทำมาจากยางไม้ ไขมัน น้ำมันสัตว์หรือพืช หรือกรดยางไม้ หรือจากไขมันสัตว์หรือพืช เป็นต้น มีทั้งชนิดผงและชนิดน้ำ

- สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Agent) สารชนิดนี้จะช่วยลดปริมาณของน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตลงได้ เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าๆ กัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา หรืออาจกล่าวได้ว่าสารชนิดนี้จะช่วยเพิ่มความเหลวและเพิ่มการยุบตัวของคอนกรีตนั่นเอง ซึ่งในการลดปริมาณน้ำนั้นก็จะมีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นการลดการแยกตัวและการสูญเสีย น้ำ ยังจะช่วยเพิ่มความแน่นและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมได้อีกด้วย

สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำจากกรดหรือเกลือลิกโนซัลโฟนิค ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากอุตสาหกรรมการทำเยื่อไม้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนทำการทดลองที่ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

##### 3.1.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารกรอง

สารกรองที่ผ่านการตัดขนาดและทำความสะอาดแล้วนำไปวิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญ คือ พื้นที่ผิว(surface area) และปริมาตรโพรง(pore volume) วิเคราะห์โดยเครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer Emmett-Teller) และวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษคอนกรีตโดยเครื่อง X-Ray Diffraction

##### 3.1.2 ศึกษากระบวนการกรอง

การทดลองกระทำโดยใช้ถังกรองและชุดตัวอย่างจำนวน 2 ชุด ซึ่งชุดที่ 1 ตัวแปรอิสระที่ศึกษามี 2 ตัว ได้แก่ ขนาดเศษคอนกรีต อัตราการไหลของน้ำ จำนวนชุดตัวอย่าง 9 ชุด ตามแผนผังการวิจัยดังนี้

ขนาดเศษคอนกรีต (มม.)	อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)
0.4-0.6	1
	5
	10
0.7-1.2	1
	5
	10
1.6-2.0	1
	5
	10

ชุดที่ 2 ตัวแปรอิสระที่ศึกษามี 1 ตัว ได้แก่ ระดับความลึกของชั้นสารกรอง จำนวนชุดตัวอย่าง 1 ชุด วิเคราะห์ตัวอย่างที่ระดับชั้นสารกรอง 0.5 , 1.0 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ

### 3.2 การเตรียมอุปกรณ์และติดตั้งเครื่องมือ

#### 3.2.1 แบบจำลองถังกรอง

ในการทดลองนี้จะใช้ถังกรองทำด้วยท่ออะคริลิกใสรูปทรงกระบอกสูง 2.5 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.04 ม.(พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $1.52 \times 10^{-3}$ ) สำหรับท่อเก็บตัวอย่างมี 3 จุด คือ ที่ระดับความลึกจากผิวบนของชั้นเศษคอนกรีต 0.5 , 1.0 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ (ตามรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองถังกรองและอุปกรณ์ในการทดลอง

### 3.2.2 เครื่องสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังกรอง

เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น แบบ Diapharm ยี่ห้อ JUN Aquarium Equipment รุ่น HX-4500 โดยสูบน้ำเข้าถังพักน้ำก่อนเพื่อทำการปรับอัตราการไหลของน้ำให้คงที่และมีการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันของน้ำเสียและปรับอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม

และใช้เครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Pump ยี่ห้อ KOSOKU รุ่น LS-180 A อัตราการไหล 200 ลิตร/นาที่ ในการทำการล้างย้อน

### 3.2.3 สารกรอง

สารกรองที่ใช้ในการวิจัยเป็นเศษคอนกรีต นำมาบดและทำการร่อนคัดขนาด ( แสดงดังรูปที่ 3.2) ได้แก่

1. ขนาด 0.4-0.6 มม. ร่อนผ่านตะแกรงระหว่างเบอร์ 40 และ เบอร์ 35 ของ U.S. Sieve Series-ASTM Specifation E-11-61
2. ขนาด 0.7-1.2 มม. ร่อนผ่านตะแกรงระหว่างเบอร์ 25 และ เบอร์ 16 ของ U.S. Sieve Series-ASTM Specifation E-11-61
3. ขนาด 1.6-2.0 มม. ร่อนผ่านตะแกรงระหว่างเบอร์ 12 และ เบอร์ 10 ของ U.S. Sieve Series-ASTM Specifation E-11-61

จากนั้นนำไปล้างให้สะอาดและแช่น้ำไว้โดยเปลี่ยนน้ำทุกวันเป็นเวลาประมาณ 1 สัปดาห์ นำไปผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.2 เศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.4 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 อาคารวิทยกิตต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างเดือน ธันวาคม 2542 ถึง เดือน กุมภาพันธ์ 2543

### 3.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสีย

การเก็บตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บตัวอย่าง 4 จุด คือ ที่ถังพักน้ำก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดและน้ำออกจากระบบที่ท่อเก็บตัวอย่างน้ำของถังกรองที่ระดับความลึกจากผิวบนของชั้นสารกรองที่ระยะ 0.5 , 1.0 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์ ซึ่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1

การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการทดลอง มีตัวแปรที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่

ตัวแปรที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1.ค่าความเป็นกรดต่าง	1.พีเอชมิเตอร์
2.ของแข็งแขวนลอย	2.ทำให้แห้งที่ 103-105 ° C
3.ซีไอดี	3.รีฟลักซ์แบบปิด
4.ไนเตรต-ไนโตรเจน	4.อูลตราไวโอเล็ต สเปคโตรโฟโตเมตริก
5.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	5.มาโครเคลดดาห์ล
6.ไนโตรเจนทั้งหมด	6. มาโครเคลดดาห์ล
7.ฟอสฟอรัสทั้งหมดทั้งหมด	7.การย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

- ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS โดยใช้ Duncan's Multiple Range Test ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาโดยการเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการกรอง ได้แก่ ขนาดเศษคอนกรีต และอัตราการไหลของน้ำ
- วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดของแข็งแขวนลอยและซีไอดี โดย การนำมาทดสอบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ด้วยวิธี Correlation

**บทที่ 4**  
**ผลการศึกษาและอภิปราย**

**4.1 ผลการหาลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต**

จากการนำเศษคอนกรีตที่ขนาดแตกต่างกันมาทดสอบลักษณะทางกายภาพ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต

ขนาดเศษคอนกรีต (มม.)	คุณสมบัติทางกายภาพ	
	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรความพรุน (ลบ.ซม./ก.)
0.4-0.6	4.9265	0.017795
0.7-1.2	4.1005	0.013349
1.6-2.0	2.2301	0.005210

และเมื่อนำเศษคอนกรีตมาทดสอบด้วยวิธีการ X-Ray Diffraction พบว่า องค์ประกอบหลักของเศษคอนกรีต ได้แก่  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  (แสดงดังภาคผนวก ก)

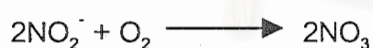
**4.2 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง**

ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้เข้าระบบในกระบวนการกรองนี้เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 ของอาคารวิทยกิตต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาคารที่มีกิจกรรมเป็นอาคารเรียน สำนักงานและโรงอาหาร ดำเนินการเก็บน้ำตัวอย่างน้ำเสียในช่วงเวลาประมาณ 10.30-11.30 น.วันจันทร์-ศุกร์ ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2542 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2543 ซึ่งตัวอย่างน้ำเสียที่ได้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2\_ คุณภาพน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสีย อาคารวิทยกิตต์

พารามิเตอร์	หน่วย	ปริมาณ
1.ค่าความเป็นกรดต่าง	-	7.3-7.9
2.ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	6-50
3.ซีโอดี	มก./ล.	44.5-116.4
4.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	มก./ล.	12.88-19.88
5.ไนโตรเจนทั้งหมด	มก./ล.	18.96-29.71
6.ไนเตรต-ไนโตรเจน	มก./ล.	2.3-4.3
7.ฟอสฟอรัสทั้งหมด	มก./ล.	1.1-9.2

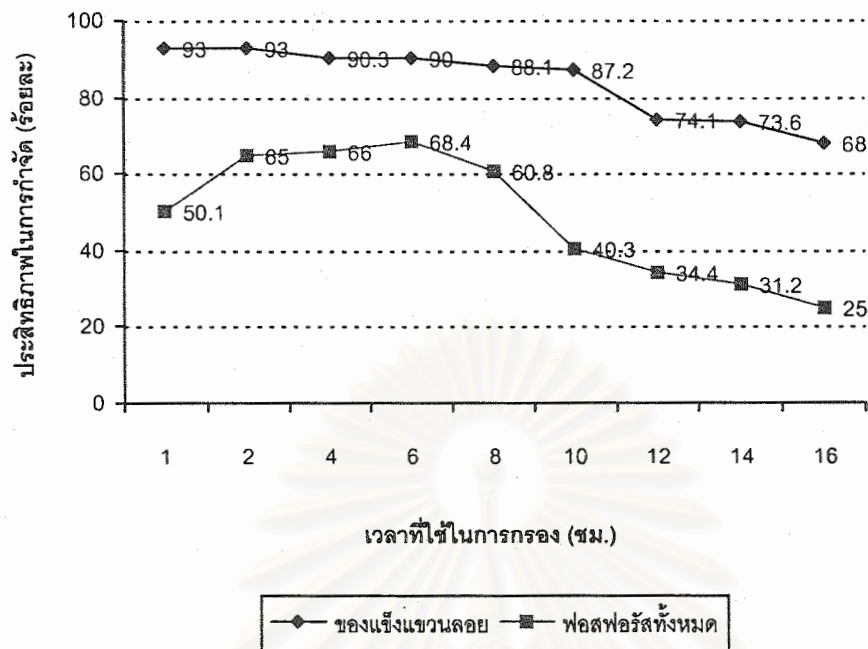
ผลการทดลองพบว่า ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมด ของน้ำเข้าระบบมีความแปรปรวนมากบางช่วงมีค่าสูงและบางช่วงมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีที่แอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าสูงมากในบางช่วงเนื่องจากกรณีที่มีการเติมอากาศให้แก่ น้ำเสียไม่เพียงพอสำหรับการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนเตรต ทำให้น้ำที่ออกมามีค่าแอมโมเนียสูง แต่ถ้ามีการเติมอากาศอย่างเพียงพอ น้ำที่ออกจากระบบจะมีค่าแอมโมเนียต่ำ ดังสมการ



#### 4.3 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกรองของเศษคอนกรีต

ในการทดลองนี้เลือกเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ที่ระดับความลึกของชั้นสารกรอง 1.5 ม. มาทำการทดสอบหาอายุการใช้งานของเศษคอนกรีตพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารมีค่าคงที่ในระยะแรกๆ ช่วงชั่วโมงที่ 2-8 ต่อมาประสิทธิภาพในการกำจัดจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และจะลดลงอย่างมากในช่วงท้ายๆ ประมาณชั่วโมงที่ 10 ของการทดลอง (แสดงผลดังรูปที่ 4.1) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุด คือ ชั่วโมงที่ 6 ของการเดินระบบ





รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และฟอสฟอรัสทั้งหมดกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกรอง

#### 4.4 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนขนาดของเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ

: ทำการทดลองบรรจุเศษคอนกรีตที่ระดับความลึก 1.5 ม. ใช้เวลาในการเดินระบบ 6 ชม.

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง ของแข็งแขวนลอย ซีไอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด ซึ่งข้อมูลสำหรับการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

##### 4.4.1 ประสิทธิภาพของกระบวนการกรองที่มีต่อค่าความเป็นกรดต่าง

ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเข้าและออกจากระบบ พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 7.3-7.8 ส่วนค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ผ่านระบบออกมาจะมีค่าระหว่าง 7.9-10.7

## 1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.2

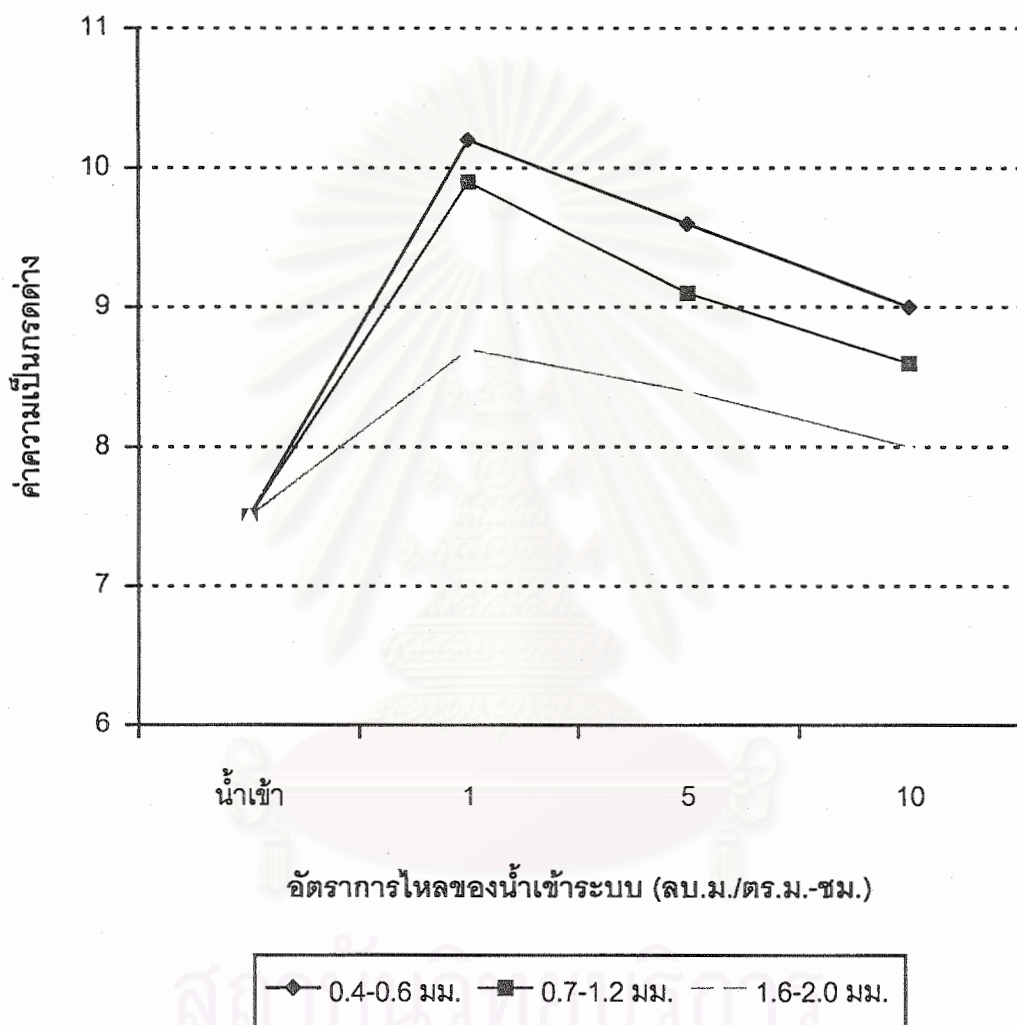
- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 10.2, 9.5 และ 9.0 ตามลำดับ
- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 9.9, 9.1 และ 8.6 ตามลำดับ
- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 8.7, 8.4 และ 8.0 ตามลำดับ

## 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.2

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 10.2, 9.9 และ 8.7 ตามลำดับ
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 9.6, 9.1 และ 8.4 ตามลำดับ
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 9.0, 8.6 และ 8.0 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง คือ เมื่อเศษคอนกรีตที่ใช้มีขนาดเล็กน้ำที่ออกจากระบบจะมีค่าเป็นด่างสูง และค่าความเป็นด่างจะลดลงเมื่อใช้เศษคอนกรีตที่ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการเพิ่มความเร็วของอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับขนาดเศษคอนกรีต การทดลองพบว่า เมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่ทุกอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ออกจากระบบมีค่า 8.0-8.7 และที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. สำหรับเศษคอนกรีตทั้ง 3 ขนาดจะให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ออกจากระบบในช่วง 8.0-9.0 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนที่กำหนดให้มีค่าในช่วง 5-9 กลไกที่เกิดขึ้น คือ การที่เศษคอนกรีตมีพื้นที่ผิวมากและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบต่ำจะทำให้โอกาสในการที่น้ำสัมผัสกับแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา มี

มากขึ้น ดังนั้นน้ำที่ออกจากระบบที่ได้จึงมีค่าความเป็นด่างสูงจาก  $(OH^-)$  ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต  $(CO_3^{2-})$  และไบคาร์บอเนต  $(HCO_3^-)$



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดด่างที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 4-50 มก./ล. และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการกรองของแข็งแขวนลอยจะมีค่าระหว่าง 0-8 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดจะให้ผลการทดลอง ดังนี้

##### 1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.3

- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 93.7, 92.4 และ 83.4 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 91.5, 90.2 และ 81.3 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 89.2, 89.3 และ 78.7 ตามลำดับ

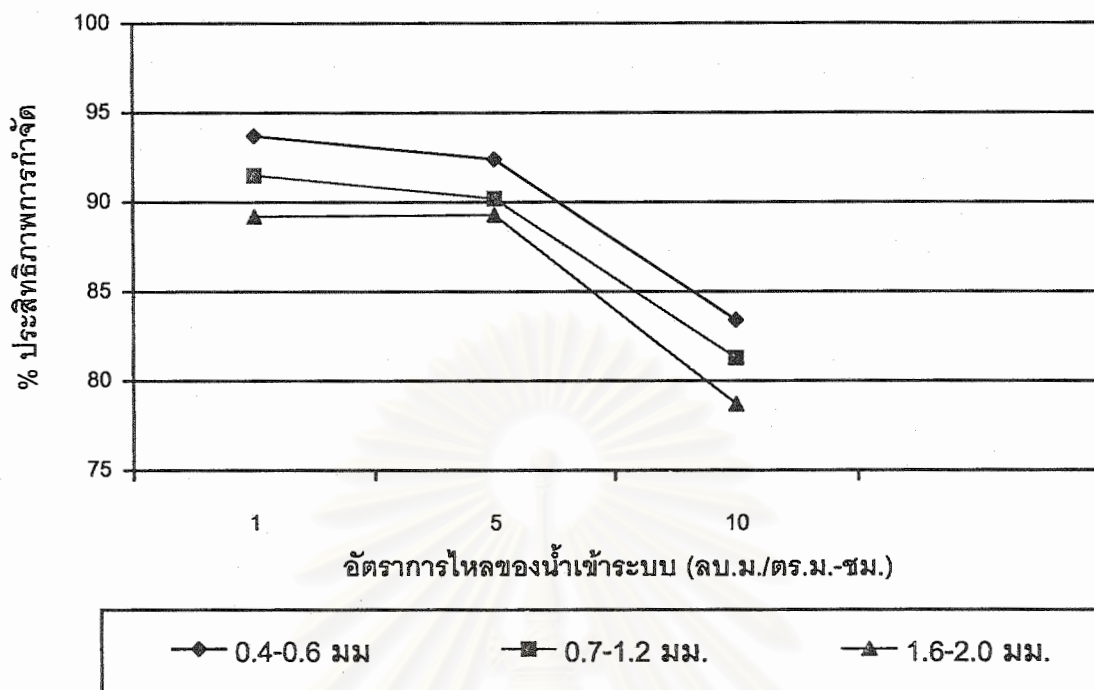
##### 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.3

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 93.7, 91.5 และ 89.2 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 92.4, 90.2 และ 89.3 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 83.4, 81.3 และ 78.7 ตามลำดับ

จากข้อมูลและรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดเศษคอนกรีตและให้น้ำที่เข้าระบบไหลช้าๆ โดยเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาดต่างๆกัน ดังนี้ 0.4-0.6 มม., 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ตามลำดับ และทำการปรับอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่อัตรา 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยในแต่ละการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ขนาดของเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงที่สุด คือ ร้อยละ 93.7 เนื่องจากเศษคอนกรีตขนาดเล็กจะมีความพรุนมากกว่าเศษคอนกรีตขนาดใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุดเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.เท่ากับ ร้อยละ 78.7 แต่การกรองส่วนใหญ่จะเกิดที่ 20-30 ซม.จากผิวบนของชั้นสารกรอง และเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเร็วขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดัน ดังนั้นการดักจับตะกอนแขวนลอยจะทำไม่ได้มากทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะลดลง เมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS ด้วยวิธี DMRT (ดังภาคผนวก ค) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย โดย ขนาดเศษคอนกรีตแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.6504$  และ ของอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.0001$  แสดงว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม.และ 1.6-2.0 มม. และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 44.5-116.4 มก./ล และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการกรองค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 13.8-80.0 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดแสดงดังผลการทดลอง

##### 1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.4

- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 lb.m./tr.m.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 61.8, 49.0 และ 44.3 ตามลำดับ
- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 lb.m./tr.m.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 51.6, 48.3 และ 38.6 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 49.6, 46.8 และ 37.9 ตามลำดับ

## 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.4

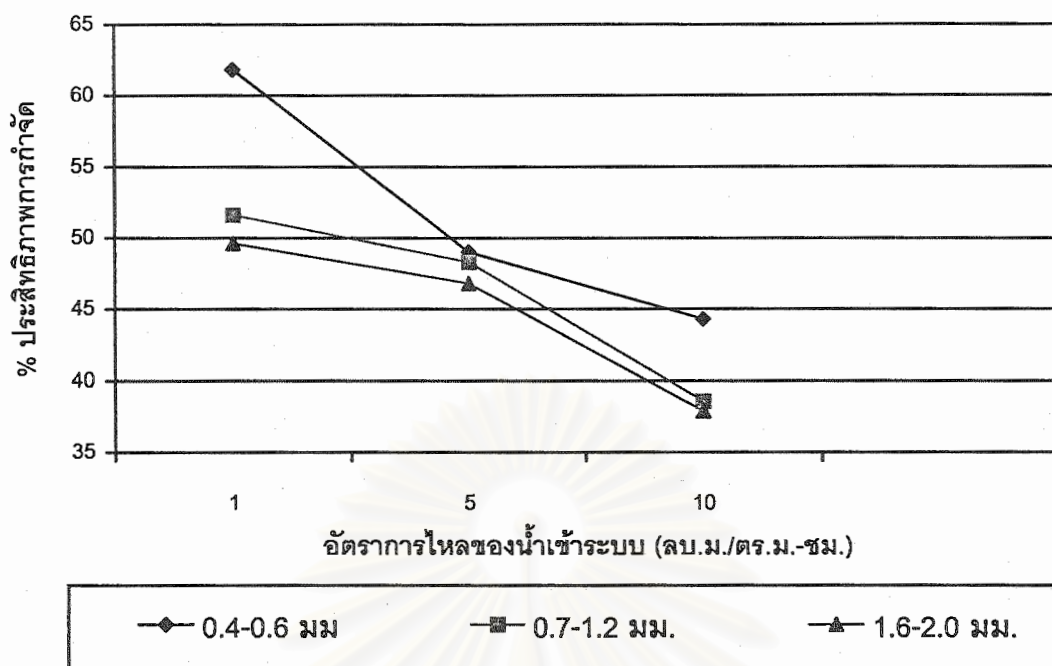
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 61.8, 51.6 และ 49.6 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 49.0, 48.3 และ 38.6 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 49.6, 46.8 และ 37.9 ตามลำดับ

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในแต่ละระบบ ดังรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจากกราฟสามารถสรุปได้ว่า ที่ทุกอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเมื่อเศษคอนกรีตมีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันที่ทุกๆ ขนาดเศษคอนกรีตเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเร็วขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน จะเห็นว่าเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงสุด คือ ร้อยละ 61.8 และเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 37.9

ซึ่งผลการทดลองที่แสดงไว้สามารถอธิบายได้ว่า การลดลงของซีไอดีในกระบวนการกรองมาจากการการกรองของแข็งแขวนลอย ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเช่นกัน



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 12.84 - 19.88 มก./ล และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการกรองค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนจะอยู่ในช่วง 10.22 - 18.42 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่า ดังนี้

#### 3. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.5

- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 22.1, 25.6 และ 9.1 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 20.7, 24.3 และ 8.8 ตามลำดับ



- เศษคองกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 20.5, 24.2 และ 8.2 ตามลำดับ

#### 4. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.5

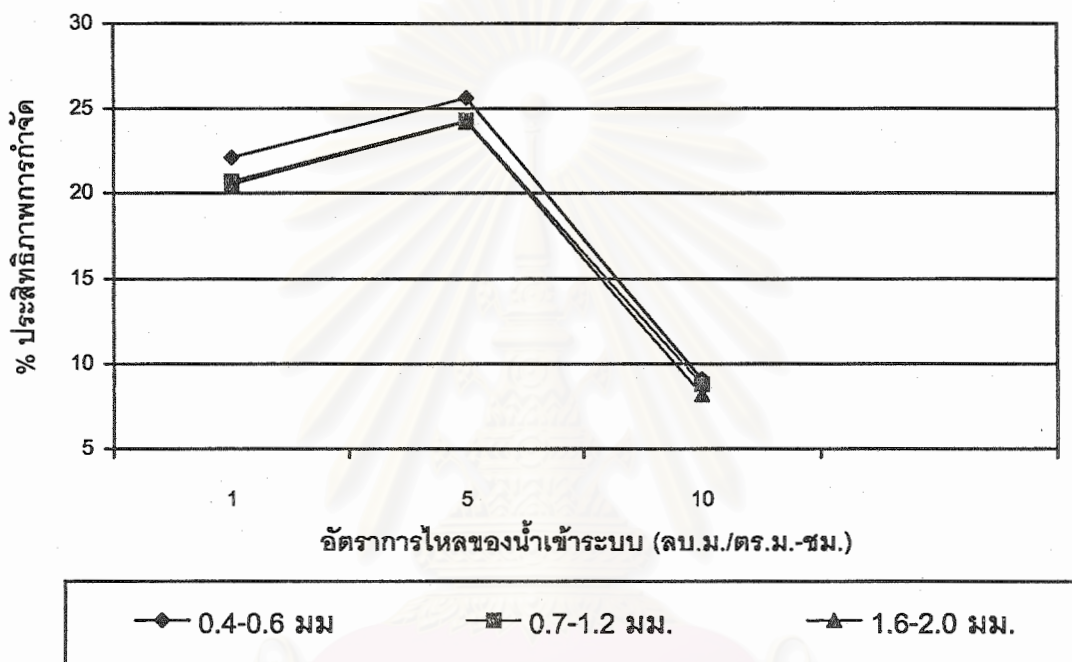
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคองกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 22.1, 20.7 และ 20.5 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคองกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 25.6, 24.3 และ 24.2 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคองกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 9.1, 8.8 และ 8.2 ตามลำดับ

รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของน้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการกรองมีการเปลี่ยนแปลง คือ การเพิ่มขนาดเศษคองกรีตระหว่างขนาดมีผลน้อยมากต่อกระบวนการกรอง และเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 และ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม ประสิทธิภาพในการกำจัดจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำมาก สามารถสรุปได้ว่า เศษคองกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงที่สุด คือ ร้อยละ 25.6 และเมื่อใช้เศษคองกรีตขนาด 1.6-2.0 ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 8.2 ทำการทดสอบทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS ด้วยวิธี DMRT (ดังภาคผนวก ค) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่แตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.0001$  แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่ต่างกันจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนแตกต่างกันโดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบประสิทธิภาพในการกำจัดของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลง และขนาดเศษคองกรีตแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.6504$  แสดงว่าเศษคองกรีตขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลองมีอิทธิพลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน เนื่องจากในการทดลองเมื่อเสร็จสิ้นการกรองแต่ละครั้งจะทำการล้าง

ย้อนทำให้เศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กขึ้นไปเรียงตัวอยู่ด้านบนและแรงดันน้ำที่ทำการล้างย้อนอาจทำให้ขนาดของเศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 1 และ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากมีค่าความเป็นด่างที่เหมาะสม คือ ประมาณ 9 ซึ่งกลไกในการกำจัดคาดว่าเกิดจากการที่แอมโมเนียในรูปกาซละลายน้ำออกมา



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.5 ประสิทธิภาพการกำจัด ไนโตรเจนทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 18.96 - 29.71 มก./ล. นำมาผ่านกระบวนการกรองค่าไนโตรเจนทั้งหมดยังคงเหลืออยู่ในช่วง 14.10 - 24.80 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดได้ผล ดังนี้

## 1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.6

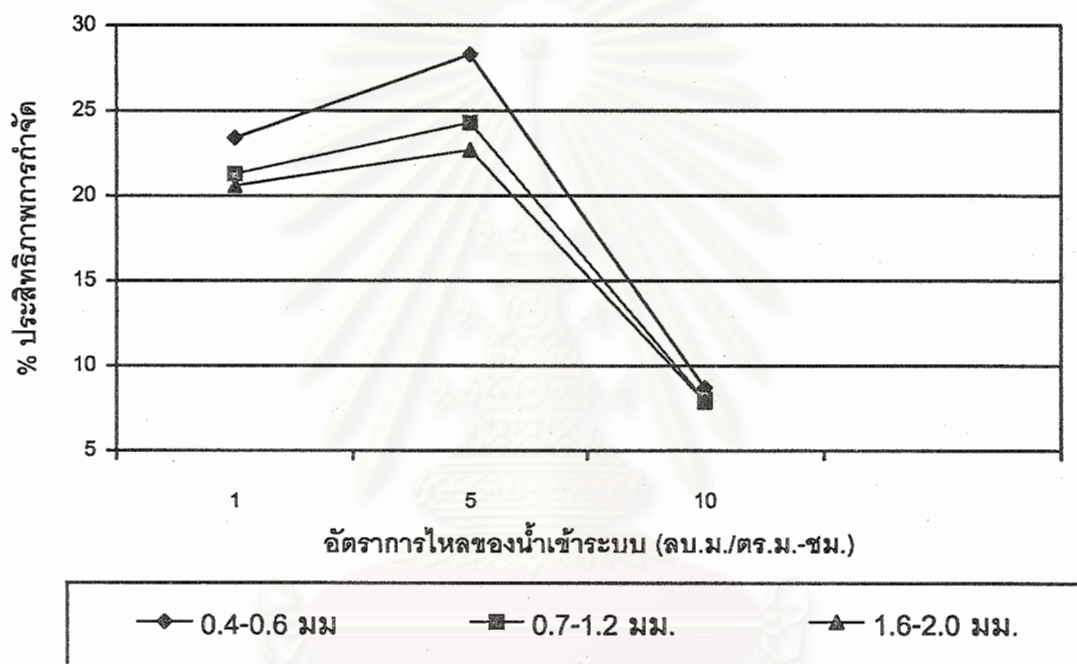
- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดในโตรเจนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 23.4, 28.3 และ 8.7 ตามลำดับ
- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดในโตรเจนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 21.3, 24.4 และ 8.0 ตามลำดับ
- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดในโตรเจนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20.6, 22.7 และ 7.9 ตามลำดับ

## 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.6

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 23.4, 21.3 และ 20.6 ตามลำดับ
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 28.3, 24.4 และ 22.7 ตามลำดับ
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 8.7, 8.0 และ 7.9 ตามลำดับ

รูปที่ 4.6 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดในโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการกรองมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับแอมโมเนีย-ในโตรเจน สามารถสรุปได้ว่า เศษคอนกรีตที่ขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงที่สุด คือ ร้อยละ 28.3 และเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 7.9 โดยทำการทดสอบทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS ด้วยวิธี DMRT (ดังภาคผนวก ค) ที่ระดับนัย

สำคัญ 0.05 เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ พบว่า อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.0001$  แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่ต่างกันจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดโดยเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเร็วประสิทธิภาพในการกำจัดของไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง และขนาดเศษคอนกรีตแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.1156$  สามารถสรุปผลได้เช่นเดียวกับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าไนโตรเจนทั้งหมดที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 พบว่า น้ำทิ้งก่อนเข้าระบบไนเตรต-ไนโตรเจน อยู่ในช่วง 2.7-4.3 มก./ล นำมาผ่านกระบวนการกรองค่าไนเตรต-ไนโตรเจนยังคงเหลืออยู่ในช่วง 0.3-3.1 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดแสดงผล ดังนี้

## 1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.7

- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 58.7, 56.2 และ 43.0 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 51.7, 51.5 และ 20.8 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 50.5, 49.4 และ 18.1 ตามลำดับ

## 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.7

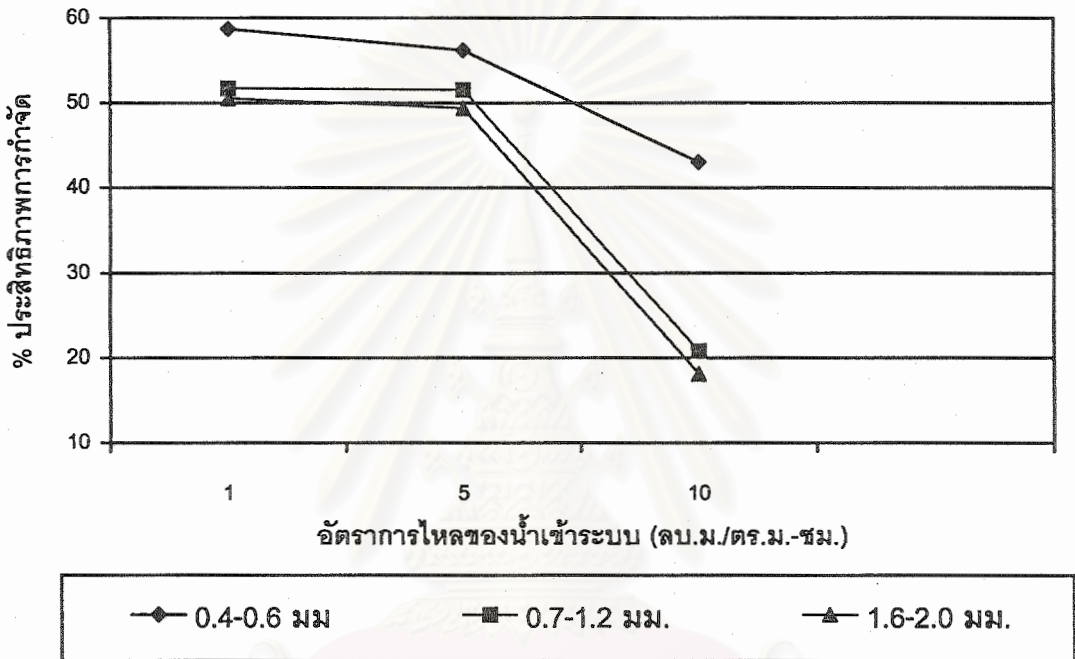
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 58.7, 51.7 และ 50.5 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 56.2, 51.5 และ 49.4 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 43.0, 20.8 และ 18.1 ตามลำดับ

รูปที่ 4.7 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนของน้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการกรอง สามารถสรุปได้ว่า เศษคอนกรีตที่ขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงที่สุด คือ ร้อยละ 58.7 และเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 18.1 จากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนเมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS ด้วยวิธี DMRT (ดังภาคผนวก ค) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน คือ ไนเตรต-ไนโตรเจนสามารถละลายน้ำได้ดี ดังนั้นการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนคาดว่าเนื่องมาจากการละลายน้ำ



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าไนเตรต-ไนโตรเจนทั้งหมดที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด ฟอสฟอรัสทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า น้ำเสียก่อนเข้าระบบมีฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.1-9.2 มก./ล. เมื่อผ่านกระบวนการกรองค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดยังคงเหลืออยู่ในช่วง 0.5-5.2 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าดังนี้

1. ที่เศษคอนกรีตขนาดแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.8

- เศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 69.6, 60.8 และ 44.5 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 0.7-1.2 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 65.2, 56.6 และ 41.8 ตามลำดับ

- เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1, 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 59.6, 53.6 และ 39.3 ตามลำดับ

## 2. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.8

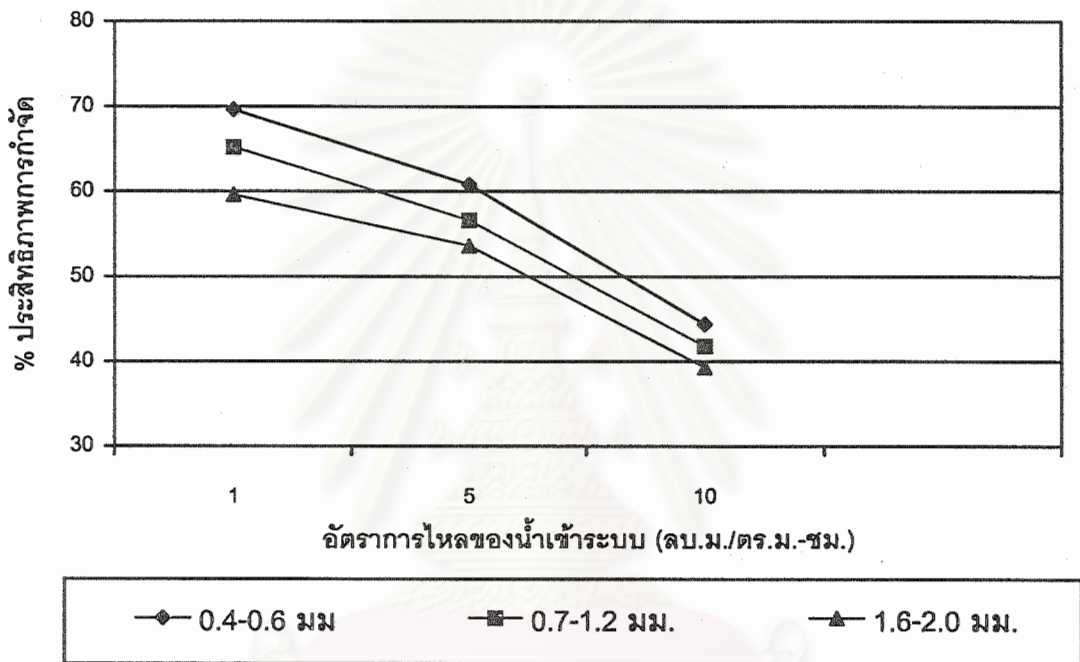
- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 69.6, 65.2 และ 59.6 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 60.8, 56.6 และ 53.6 ตามลำดับ

- อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม สำหรับเศษคอนกรีตขนาด 0.4-0.6 มม. 0.7-1.2 มม. และ 1.6-2.0 มม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 44.5, 41.8 และ 39.3 ตามลำดับ

รูปที่ 4.8 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเสียที่นำมาผ่านกระบวนการกรองเนื่องมาจากการตกตะกอนของแคลเซียมกับฟอสฟอรัสในน้ำได้สารประกอบฟอสเฟตเกิดขึ้นซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับค่าความเป็นกรดต่างในระบบที่มีค่าอยู่ในช่วง 8-10.2 ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างนี้เหมาะสมต่อการตกตะกอนของ สามารถสรุปได้ว่า เศษคอนกรีตที่ขนาด 0.4-0.6 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงสุด คือ ร้อยละ 69.6 และเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 39.3 จากค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS ด้วยวิธี DMRT (ดังภาคผนวก ค) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

ค่า  $Pr > F = 0.0001$  แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่ต่างกันจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดแตกต่างกันโดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบประสิทธิภาพในการกำจัดของฟอสฟอรัสทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง และของขนาดเศษคอนกรีตแตกต่างกัน ค่า  $Pr > F = 0.1388$  แสดงให้เห็นว่าเศษคอนกรีตขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลองมีอิทธิพลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเช่นเดียวกับซีโอดี



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ขนาดเศษคอนกรีตและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

#### 4.5 ปริมาณน้ำที่ผลิตได้และน้ำล้างย้อน

ผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้และน้ำล้างย้อนที่ใช้ในการทดลอง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3



ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ผลิตได้และน้ำล้างย้อน

ขนาดเศษคอนกรีต (มม.)	อัตราการไหลของน้ำ เข้าระบบ (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)	ปริมาณน้ำ ที่ผลิตได้ (ลิตร)	ปริมาณน้ำล้างย้อน (ลิตร)
0.4-0.6	1	9.4	20
	5	46.8	30
	10	93.6	30
0.7-1.2	1	9.4	20
	5	46.8	30
	10	93.6	30
1.6-2.0	1	9.4	20
	5	46.8	30
	10	93.6	30

จากการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำที่ผลิตได้สำหรับอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะมากกว่าที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร พบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ดังตารางที่ 4.)

#### 4.6 ผลของระดับความลึกของเศษคอนกรีตที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร

จากผลการทดลองจึงเลือกใช้เศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม. และ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. มาศึกษาหาระดับความลึกของชั้นสารกรองที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารให้ผลดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ดังนี้

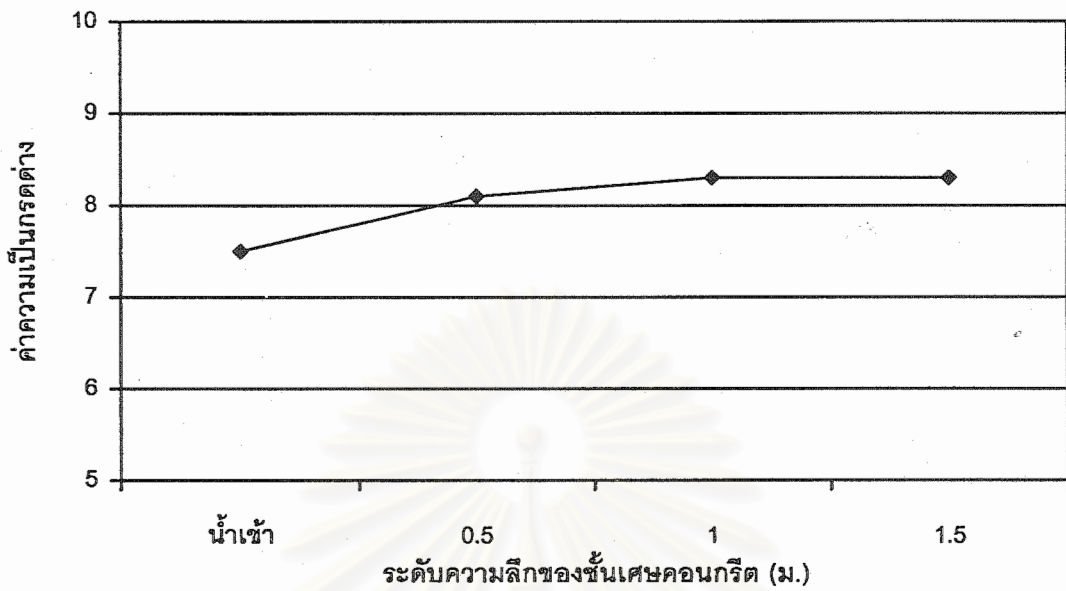
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของสารอินทรีย์และสารอาหารเข้าและออกจากระบบที่แต่ละระดับ ความลึกของเศษคอนกรีต ( แสดงผลดังรูปที่ 4.9-4.14 )

ตัวแปร	หน่วย	น้ำเข้า	น้ำออกเฉลี่ยที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต (ม.)		
			0.5	1.0	1.5
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	7.5	8.1	8.3	8.3
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	17.8	4.4	3.0	1.8
ซีโอดี	มก./ล.	90.6	54.1	54.6	50.6
ไนเตรต-ไนโตรเจน	มก./ล.	2.3	1.1	1.1	0.8
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	มก./ล.	4.9	2.1	1.9	2.0

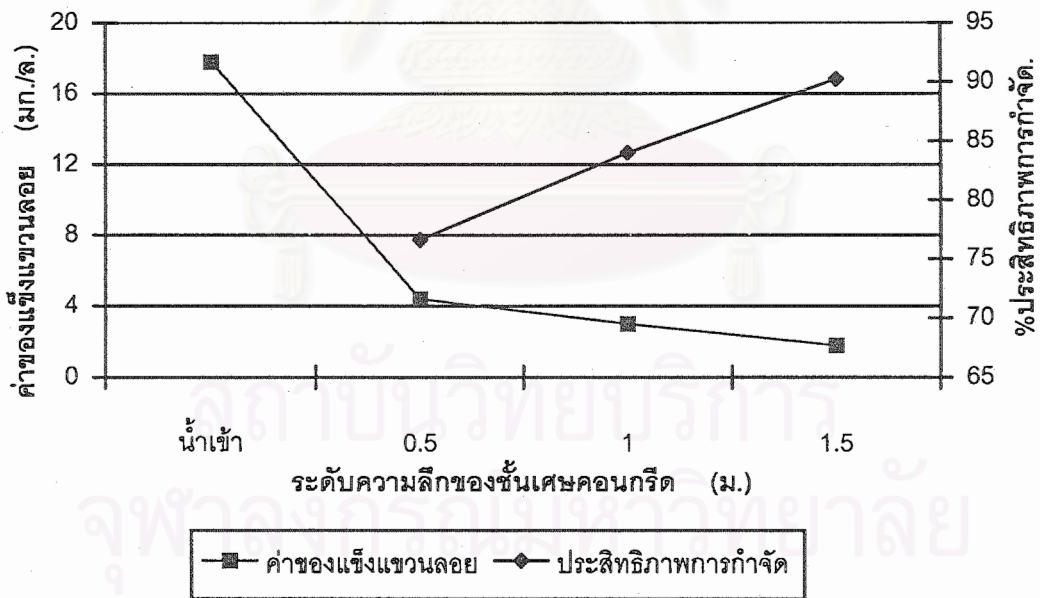
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารที่ระดับความลึกของชั้นสารกรองแตกต่างกัน ( แสดงผลดังรูปที่ 4.10-4.14 )

ตัวแปร	หน่วย	ระดับความลึกของชั้นเศษคอนกรีต (ม.)		
		0.5	1.0	1.5
ของแข็งแขวนลอย	ร้อยละ	76.6	84.0	90.2
ซีโอดี	ร้อยละ	36.1	42.3	46.9
ไนเตรต-ไนโตรเจน	ร้อยละ	47.2	45.2	61.1
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	ร้อยละ	56.0	59.8	58.4

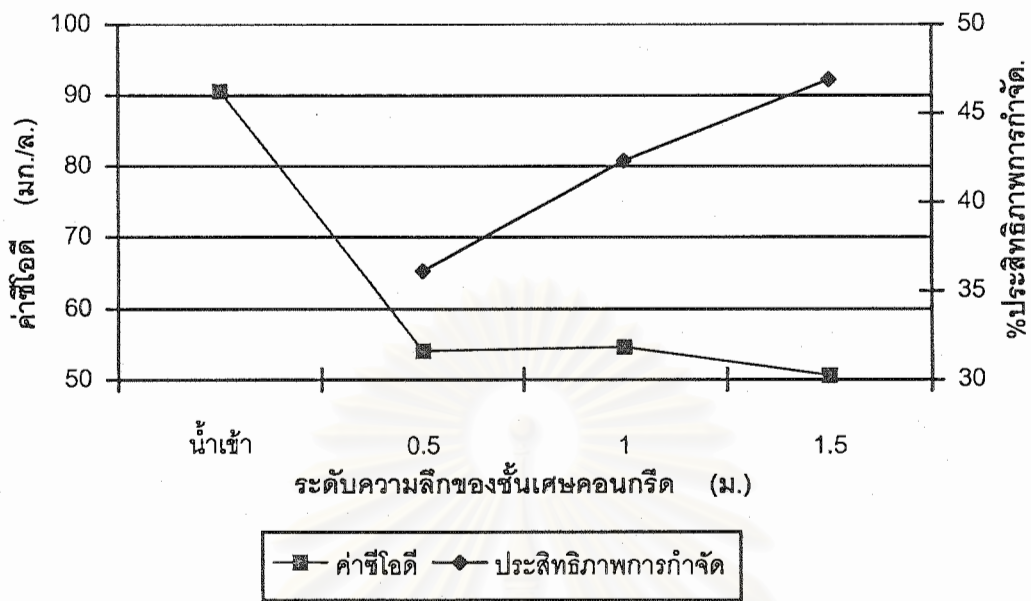
จากผลการทดลองพบว่าในแต่ละตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ ระดับความลึก 1.5 ม.จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ ที่ระดับ 1.0 ม.และ 0.5 ม.ตามลำดับ และกระบวนการกรองจะเกิดขึ้นที่ผิวบนของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่



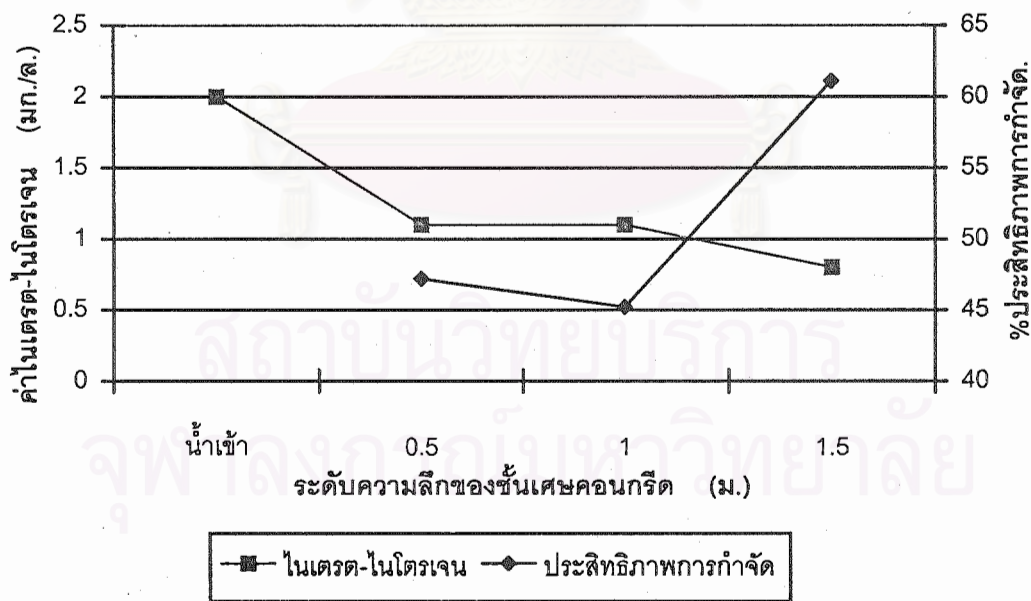
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดต่างที่ระดับความลึกของชั้นเศษคองกริตแตกต่างกัน



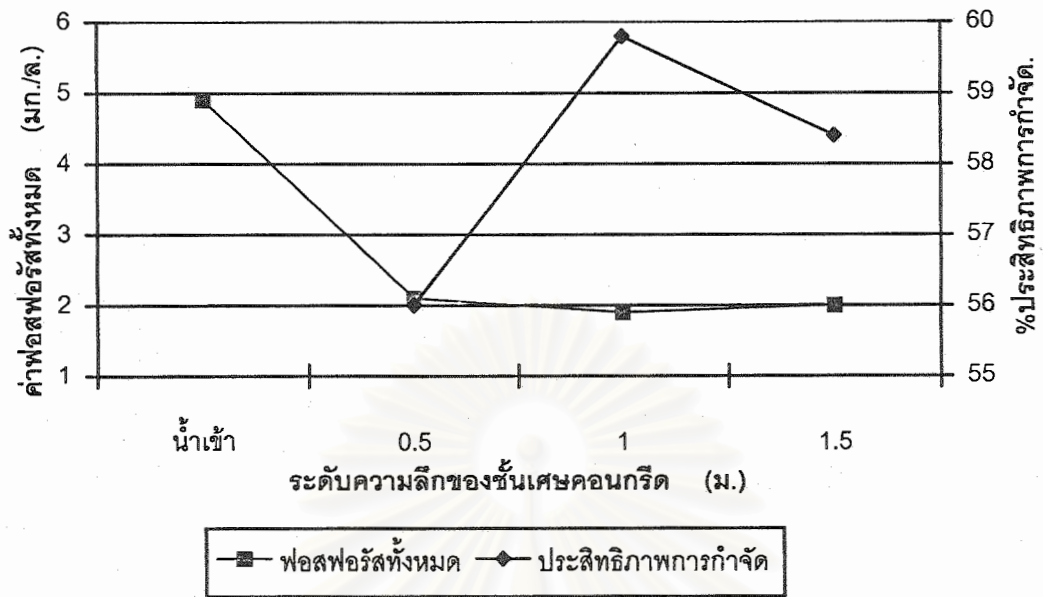
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ระดับความลึกของชั้นเศษคองกริตแตกต่างกัน



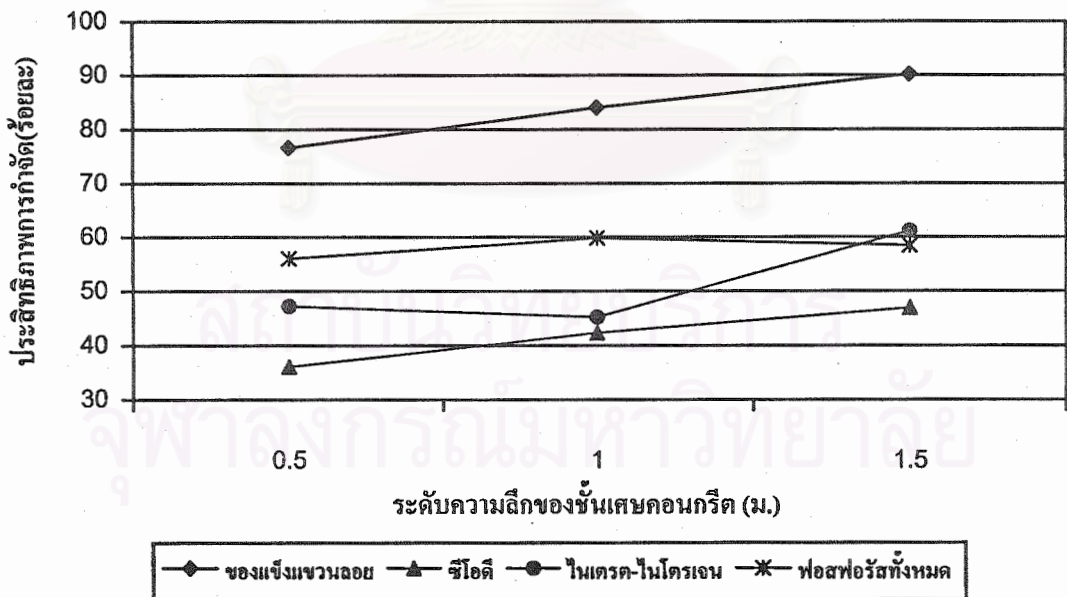
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอกนกรีดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าไนเตรต-ไนโตรเจนที่ระดับความลึกของชั้นเศษคอกนกรีดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ระดับความลึกของชั้นเศษคองกริตแตกต่างกัน



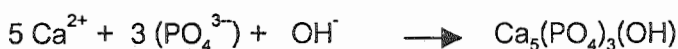
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารที่ระดับความลึกของชั้นเศษคองกริตแตกต่างกัน

#### 4.7 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร

ในการทดลองของกระบวนการกรองเมื่อนำน้ำเสียมาผ่านถังกรองที่บรรจุเศษคอนกรีตพบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดี ซึ่งการกรองจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นสารกรองจนถึงระดับความลึก 20-30 ซม. ส่วนใหญ่การกรองน้ำเป็นการกำจัดสารแขวนลอยซึ่งอาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีมีผลต่อการกรองน้ำไม่เหมือนกัน (มันสิน ,2538) โดยการตกตะกอนและการติดค้างจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นกรองหรือที่ความลึกไม่เกิน 2-3 นิ้ว จากผิวหน้าทำให้มีชั้นตะกอนปกปิดผิวบนของชั้นกรอง การแทรกตัวลงไปของกลุ่มตะกอนที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการแทรกตัวลึกลงไปชั้นสารกรองเป็นสาเหตุให้ชั้นกรองเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว (Maeesuksatid,1994) และเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเศษคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารจึงสูงกว่า เนื่องจากกระบวนการกรองประกอบด้วยกลไกทางกายภาพและทางเคมี

การเกิดกลไกทางกายภาพทำให้เกิดการติดค้างที่ชั้นสารกรองทำให้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยซึ่งมีความสัมพันธ์กับการกำจัดซีโอไลต์และฟอสฟอรัสทั้งหมด ส่วนแอมโมเนีย-ไนโตรเจนไนโตรเจนทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน จะถูกกำจัดออกโดยการละลายน้ำ

เนื่องจากเศษคอนกรีตมีแคลเซียมคาร์บอเนต( $\text{CaCO}_3$ ) และซิลิกา( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น เมื่อน้ำที่ผ่านเข้ามาในระบบจะเกิดการดูดซับที่ผิวของชั้นสารกรองทำให้สามารถลดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดได้มาก กล่าวคือ เมื่อเศษคอนกรีตบางส่วนละลายน้ำจะอยู่ในรูป  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูง การที่ในน้ำมีฟอสเฟต( $\text{PO}_4^{3-}$ )ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ของสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งเสถียรและไม่ละลายน้ำ ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{OH}^-$  เกิดเป็น  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$  สมการทางเคมีของปฏิกิริยานี้สามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยาข้างล่างนี้



ซึ่งค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 60 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดให้ผลดี

ในปัจจุบันกระบวนการกรองที่ใช้ลดระดับแอมโมเนียในน้ำมีทั้งกระบวนการทั้งทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา กระบวนการกรองเป็นวิธีการทางฟิสิกส์ใช้กำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปสารแขวนลอยซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดทำได้เล็กน้อย (Train, 1979) กล่าวว่า โดยปกติแอมโมเนียจะอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3 \longleftrightarrow \text{NH}_4^+$  สมดุลย์เคมีจะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดต่าง ปกติแล้วที่สภาพความเป็นกรดต่างประมาณ 6-9 จะอยู่ในสมดุลย์ แต่ที่สภาพความเป็นกรดต่างสูงกว่า 9.5 จะอยู่ในรูปแอมโมเนียหมด ในการทดลองเมื่อผ่านกระบวนการกรองซึ่งใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรองมีผลทำให้สภาพความเป็นกรดต่างสูงกว่า 8 ดังนั้นไนโตรเจนบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนซึ่งสามารถระเหยได้ จึงทำให้ค่าทำให้ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและค่าไนโตรเจนทั้งหมดลดลง แม้ว่าการกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจนมีค่าลดลงมากแต่เนื่องจากค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด มีค่าอยู่ในช่วง 15-20 มก./ล. ประมาณร้อยละ 60 จะเป็นแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ร้อยละ 40 เป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจน ส่วนร้อยละ 1 ที่เหลือจะเป็นไนไตรท์และไนเตรต-ไนโตรเจน (Reeves, 1972) ดังนั้นประสิทธิภาพในการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนจึงไม่มีผลต่อการลดลงของไนโตรเจนทั้งหมด

ดังนั้นถ้าเศษคอนกรีตซึ่งใช้เป็นสารกรองมีขนาดเล็กปริมาณผิวคอนกรีตมาก จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารสูงกว่าสารกรองที่มีพื้นที่ผิวน้อย แต่ในทางเดียวกันการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับน้ำจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างสูง แม้ว่าที่เศษคอนกรีตขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารดีกว่า แต่เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แล้วพบว่า ขนาดของเศษคอนกรีตมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารน้อยมาก นอกจากนี้ที่เศษคอนกรีตขนาดใหญ่ขึ้นค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ออกจากระบบจะไม่เกินค่ามาตรฐาน

Baumann และ Cleashy (1974) กล่าวว่า ขนาดสารกรองมีผลต่อการกำจัดสารแขวนลอยทั้งหมด (TSS) น้อยมาก

Adin และ Elimelech (1989) กล่าวว่า การกำจัดอนุภาคสามารถปรับปรุงให้มีขนาดสารกรองใหญ่ขึ้นในช่วง 0.7-1.2 มม. สำหรับสารกรองขนาดเล็ก 0.45-0.55 มม. จะเกิดการสูญเสียความดันและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการล้างย้อน

กล่าวได้ว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 5 และ 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ตามลำดับ นั่นคือ การที่น้ำมีโอกาสสัมผัสกับเศษคอนกรีตมาก ทำให้โอกาสเกิดกลไกทางกายภาพและทางเคมีสูง ดังนั้นค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ออกจากกระบวนการกรองมีค่าสูงการที่อัตราเร็วในการกรองสูงขึ้น จะเกิดแรงการเบียดเข้าหาสารกรองที่มีผลต่อความปั่นป่วนของน้ำและแทรกตัวลึกลงไปในพื้นที่กรอง เป็นสาเหตุให้ชั้นสารกรองเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็วและเกิดการสูญเสียความดันเร็วกว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบต่ำ ดังนั้นคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบจึงต่ำลงและทำให้ระยะเวลาในการกรองที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบสูงสั้นลง (Madesuksatid, 1994)

#### 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของกระบวนการกรอง

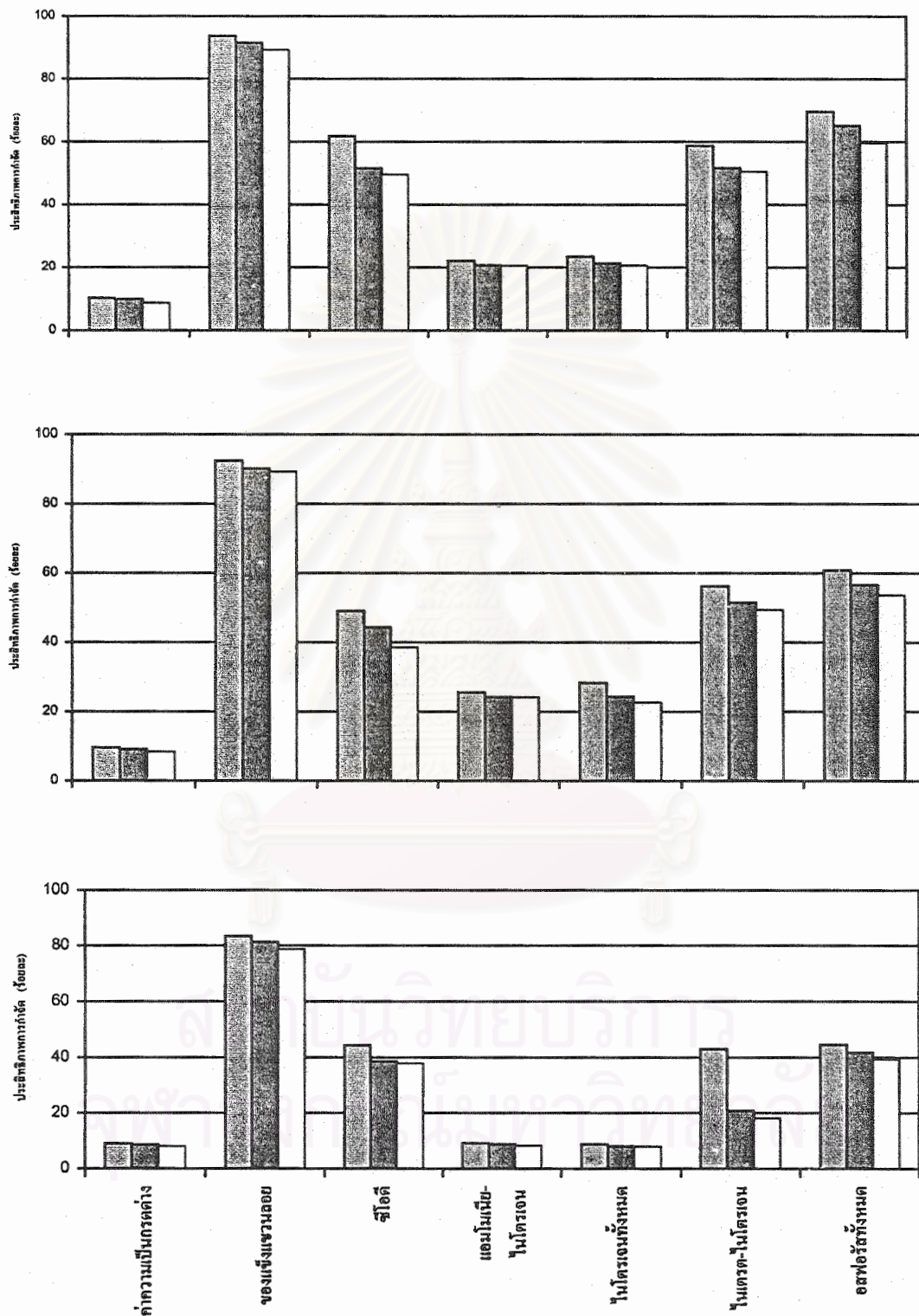
จากผลการวิจัยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของกระบวนการกรองโดยใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง แสดงผลดังตาราง ที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษคอกกรีด

ตัวแปร	หน่วย	อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ			อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ			อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ		
		1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.			5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.			10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.		
		0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1.ค่าความเป็นกรดต่าง	-	10.2	9.9	8.7	9.6	9.1	8.4	9.0	8.6	8.0
2.ของแข็งแขวนลอย	ร้อยละ	93.7	91.5	89.2	92.4	90.2	89.3	83.4	81.3	78.7
3.ซีโอดี	ร้อยละ	61.8	51.6	49.6	49.0	48.3	46.8	44.3	38.6	37.9
4.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	ร้อยละ	22.1	20.7	20.5	25.6	24.3	24.2	9.1	8.8	8.2
5.ไนโตรเจนทั้งหมด	ร้อยละ	23.4	21.3	20.6	28.3	24.4	22.7	8.7	8.0	7.9
6.ไนเตรต-ไนโตรเจน	ร้อยละ	58.7	51.7	50.5	56.2	51.5	49.4	43.0	20.8	18.1
7.ฟอสฟอรัสทั้งหมด	ร้อยละ	69.6	65.2	59.6	60.8	56.6	53.6	44.5	41.8	39.3



สารอินทรีย์และสารอาหาร

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษคอกนกริต

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของ  
เศษคอกกรีด

ตัวแปร	อัตราการไหลของน้ำ เข้าระบบ 1 ลบ.ม./ตร. ม.-ชม.			อัตราการไหลของน้ำ เข้าระบบ 5 ลบ.ม./ตร. ม.-ชม.			อัตราการไหลของน้ำเข้า ระบบ 10 ลบ.ม./ตร.ม.- ชม.		
	0.4- 0.6 มม.	0.7- 1.2 มม.	1.6- 2.0 มม.	0.4- 0.6 มม.	0.7- 1.2 มม.	1.6- 2.0 มม.	0.4- 0.6 มม.	0.7- 1.2 มม.	1.6- 2.0 มม.
	1.ค่าความเป็นกรดต่าง	-	-	++	-	-	++	+	++
2.ของแข็งแขวนลอย	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++
3.ซีโอดี	++	++	++	++	++	++	++	+	+
4.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	+	+	+	+	+	+	-	-	-
5.ไนโตรเจนทั้งหมด	+	+	+	+	+	+	-	-	-
6.ไนเตรต-ไนโตรเจน	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++
7.ฟอสฟอรัสทั้งหมด	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++

หมายเหตุ      +++ ดีมาก  
                  ++ ดี  
                  + เล็กน้อย  
                  - ไม่ได้

สามารถสรุปผลการทดลอง จากรูปที่ 4.15 ตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 พบว่า กระบวนการกรองโดยใช้เศษคอกกรีดเป็นสารกรองมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ขนาดเศษคอกกรีด 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เนื่องจากแม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษคอกกรีดขนาด 1.6-2.0 มม.ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดก็ตามแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพในการกำจัดที่อัตราการไหล 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และปริมาณน้ำที่ผลิตได้ที่อัตราการไหล 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ในเวลาเดินระบบ 6 ชม. ยังสามารถผลิตได้ 46.8 ลิตร

ดังนั้นกระบวนการกรองมีความเป็นไปได้สูงในการนำมากำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด ไนโตรเจน-ไนโตรเจน ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมดยังทำได้ไม่ดีนัก ส่วนค่าความเป็นกรดต่างของน้ำมีค่าสูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

1. ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหาร โดยใช้กระบวนการกรองที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรองขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ อันได้แก่ ขนาดสารกรอง อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ และระดับความลึกของชั้นสารกรอง

2. เศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเศษคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารจึงสูงกว่า แต่เมื่อนำประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ขนาดสารกรองที่เหมาะสม ได้แก่ ขนาด 1.6 - 2.0 มม. เนื่องจากสภาพความเป็นกรดต่างของน้ำออกจากระบบจะอยู่ในช่วง 8.0-8.7 ของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 78.7-89.3 ซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 37.9-49.6 แอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 8.2-24.2 ไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 7.9-24.4 ไนเตรต-ไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 18.1-51.7 และฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 39.3-59.6 ตามลำดับ

3. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบช้าจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเร็วซึ่งจะให้อายุในการกรองที่สั้น อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่เหมาะสมของกระบวนการกรองที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรอง เมื่อทดสอบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อัตราการกรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เนื่องจากสภาพความเป็นกรดต่างจะอยู่ในช่วง 8.4-9.6 ของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 89.3-92.4 ซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 46.8-44.3 แอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 24.2-25.6 ไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 22.7-28.3 ไนเตรต-ไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 49.4-56.2 และฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 53.6-60.8 ตามลำดับ

4. ที่แต่ละระดับความลึกของชั้นสารกรองเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกรองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
5. การกำจัดสารแขวนลอยมีความสัมพันธ์กับการกำจัดซีโอดีและฟอสฟอรัสทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แต่การกำจัดไนเตรต-ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมดคาดว่าเกิดจากการละลายน้ำ
6. จากการวิจัยนี้ได้ให้น้ำเสียซึ่งผ่านการบำบัดในขั้นที่ 2 มาทำการบำบัดเพิ่มเติมโดยการกรองพบว่า กระบวนการกรองมีประสิทธิภาพสูงในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัสทั้งหมด ไนเตรต-ไนโตรเจน มีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนโตรเจนทั้งหมด และสภาพความเป็นกรดต่างค่าสูงขึ้น
7. จากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรกรองด้วยทราย พบว่า

ตัวแปร	ประสิทธิภาพในการกำจัด (ร้อยละ)	
	เศษคอนกรีต	ทรายกรองจากงานวิจัยของ S.Farooq et al.(1994)
ซีโอดี	49.0-38.6	40-60
ไนเตรต-ไนโตรเจน	56.2-49.4	17-30
ฟอสเฟต	-	8.3-8.4
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	60.8-53.6	-

- หมายเหตุ
- ทรายกรองใช้อัตราการไหล 2 ลิตร/นาที
  - เศษคอนกรีตใช้อัตราการไหล 130 มล./นาที

ซึ่งข้อดีของงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายกรอง คือ

1. สามารถกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดและไนเตรต-ไนโตรเจนได้ดี ถึงร้อยละ 56.2-49.4 และ 60.8-53.6 ในขณะที่ทรายกรองสามารถลดไนเตรต-ไนโตรเจนได้ในระดับต่ำ
2. ลดสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีทางเคมีจะใช้ CaO เป็นตัวทำให้ตกตะกอน
3. เป็นการนำวัสดุที่หาง่ายและเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์
4. กระบวนการกรองนี้เป็นเทคนิคที่ลงทุนไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆและใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อย

9. กระบวนการกรองโดยใช้เศษคอนกรีตเป็นสารกรองมีความเหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ขนาดเศษคอนกรีต 1.6-2.0 มม. ที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เนื่องจากแม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารของเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดก็ตามแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพในการกำจัดที่อัตราการไหล 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และปริมาณน้ำที่ผลิตได้ที่อัตราการไหล 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ในเวลาเดินระบบ 6 ชม. ยังสามารถผลิตได้ 46.8 ลิตร

## บทที่ 6

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองวิเคราะห์น้ำเสียเข้าระบบ ควรทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ ควบคู่ไปกับสารอินทรีย์ และสารอาหาร เพราะในน้ำเสียชุมชนมักปนเปื้อนด้วยสารหลายชนิด เช่น โลหะหนัก
2. ควรศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี
3. ควรเพิ่มขนาดเศษคอนกรีตในการทดลองเมื่อใช้เศษคอนกรีตขนาดใหญ่จะให้ผลที่แตกต่างหรือไม่
4. จากการศึกษา พบว่า การล้างยอนด้วยน้ำแต่เพียงอย่างเดียวชั้นกรองยังไม่สะอาด เนื่องจากแรงน้ำแต่เพียงอย่างเดียวไม่พอเพียงในการขัดสีให้ทั่วถึง นอกจากนี้หลังการล้างยอนแล้ว สารกรองที่ละเอียดจะอยู่ด้านบนและสารกรองที่หยาบจะอยู่ด้านล่างทำให้เกิดการอุดตันเร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอาหารลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2531. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ:มิตรนภา การพิมพ์,

จิตติมา อรรถอารุณ. 2541. เศรษฐกิจอุตสาหกรรมซีเมนต์. ข่าวสารการธรณี. 45.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุต. 2537. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ.

ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2536. ข้อพิจารณาเกี่ยวกับปริมาณน้ำทิ้งในประเทศไทย, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 121-127.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์, มีนา พิทยโสมณกิจ, ปราณี พันธุมสินชัย และ อินจิรา นิยมธูร. 2536.

เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ. กรุงเทพฯ: หจก. ไฟน์อาร์ต. พิมพ์ครั้งที่ 1. 501 น.

ปราณี พันธุมสินชัย. 2537. คู่มือการดำเนินงานควบคุมปัญหาน้ำเสียของภาครัฐบาล องค์การบริหารส่วนจังหวัด เทศบาลและสุขาภิบาล. 4 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : เรือนแก้วการพิมพ์,

ปรีชา แสงพิลิตี. 2531. การประยุกต์ใช้ระบบการกรองโดยตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2537. คู่มือให้บริการตรวจสอบระบบบำบัดน้ำเสีย. 4 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : เรือนแก้วการพิมพ์,

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมการประปา. 2 เล่ม พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ. 232 น.

เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2524. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ. 318 น.

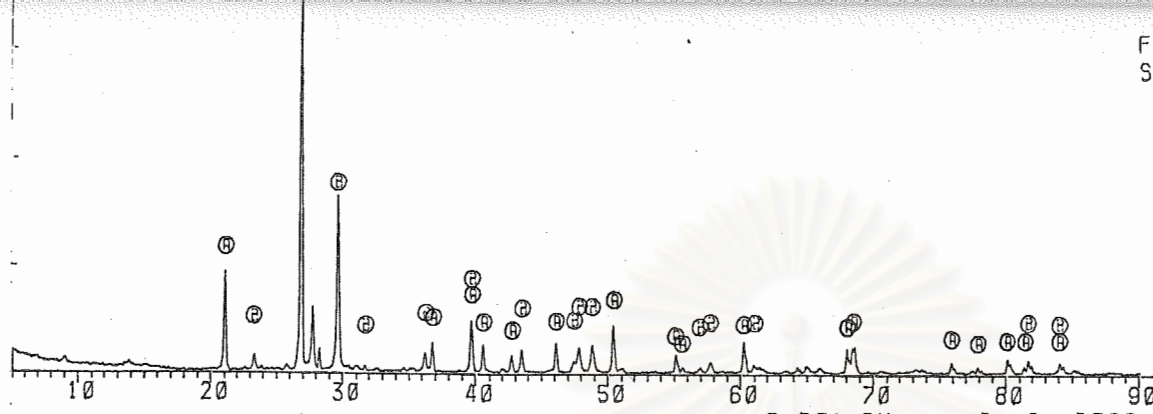
## ภาษาอังกฤษ

- Adin, A. and Asano, T. The role of physical - chemical Treatment in wastewater reclamation and reuse. 1998 .Wat.Sci.Tech. 37: 79-90.
- American Concrete Institute (ACI). 1993. Manual of Concrete Practice part 1. Michigan. United States of America. 766 p.
- American Public Work Association (APWA). 1992. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 17 th ed., Washington, D.C.: Apha, 1268 p.
- Center, S.P. and Perret, J.M. 1994 .Biological Areated Filters Assessment of the process based on 12 sewage treatment plants. Wat. Sci - Tech. 29: 13-22.
- Culp. R. L Direct filtration. 1977. Journal AWWA .69 .375-378.
- Farooq, S., Al-Yousef, A.K., and Ishaq, A.M. 1994 .Tertiary Treatment of Sewage Effluent via Pilot Scale Slow Sand Filtration. Environmental Technology. 15: 15-28.
- Hammer, M.J. 1986. Water and Wastewater Technology. 2d ed. New York :John Wiley and Son ,
- H. Mobius, C. and Crodes - Tolle, M. 1994 .Advanced Treatment of paper mill wastewaters. Wat. Sci - Tech : 29: 273-282.
- Ives, K.J. 1970. Rapid Filtration. Water Research. 4 : 201-223.
- Jonsson, L., Plaza, E. and Hultman, B. 1997 . Experiences of Nitrogen and Phosphorus Removal in Deep - Bed Filters in the Stockholm area. Wat - Sci - Tech. 36: 183 - 190.
- Kawamura. S. 1991. Integrated design of water treatment facilities. New York. John Wiley & sons,
- Kobler, M. and Boller, M. 1997 .Particle Removal Different Filtration systems for Tertiary wastewater Treatment - A comparison. Wat - Sci - Tech. 36: 259 - 267.

- Madeesuksatid, N. 1994. Pilot Scale Floto-Filter Study for Surface Water Filtration.  
Master Thesis. Asian Institute of Technology.
- Metcalf and Eddy. Inc 1991. Wastewater engineering treatment. disposal. reuse. 3rd ed  
New york McGraw-Hill Book,
- O'Melia, C.R. and W. Stumm. 1969. Theory of Water Filtration. Jour. Amer. Wat. Works.  
Assoc. 59 : p. 1393.
- Sawyer, C.N., L. McCarty and F. Parkin. 1994. Chemistry for Environmental Engineering.  
4th ed. New York : New York McGraw-Hill ., 658 p.
- Vigneeswaren, S., Tam, D.M., Visvanathan, C., and Schulz. C.R. Water filtration  
technologies for developing countries .Environmental sanitation reviews .12  
(December 1983) 35-39, 68-79, 96.
- Wattanachira, S. and Fujita, K. 1988. Biological Derifrication in Granular Filters. Water  
Pollution Control in Asia . : 563 - 569.
- Young, J.C., E.R. Baumann and D.J. Wall. 1975. Packed bed reactors for secondary  
effluent BOD and ammonia removal. J. WPCE. 47(1) : 46-56.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Measured peak



B:P01.PK 2 -6 -2000

(A)

331161 SI 02

QUARTZ, LDW

\*4

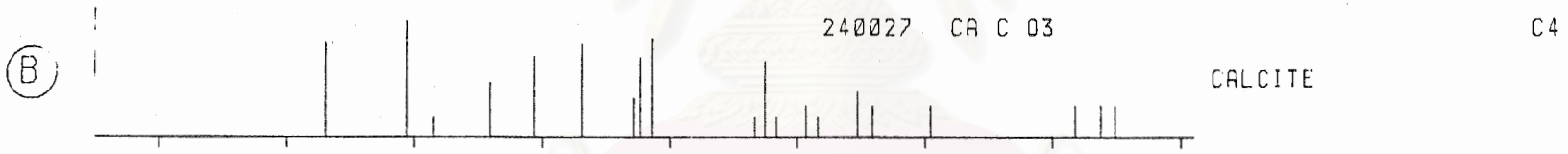
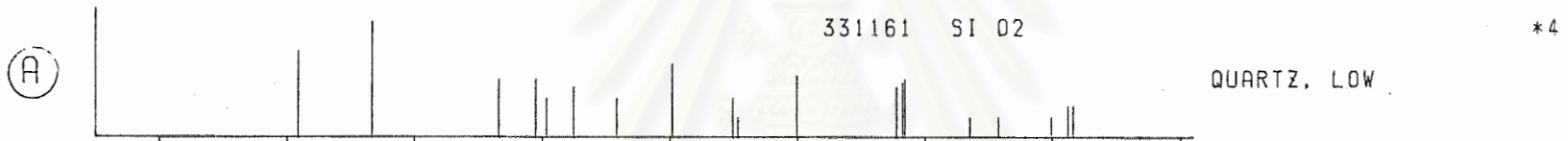
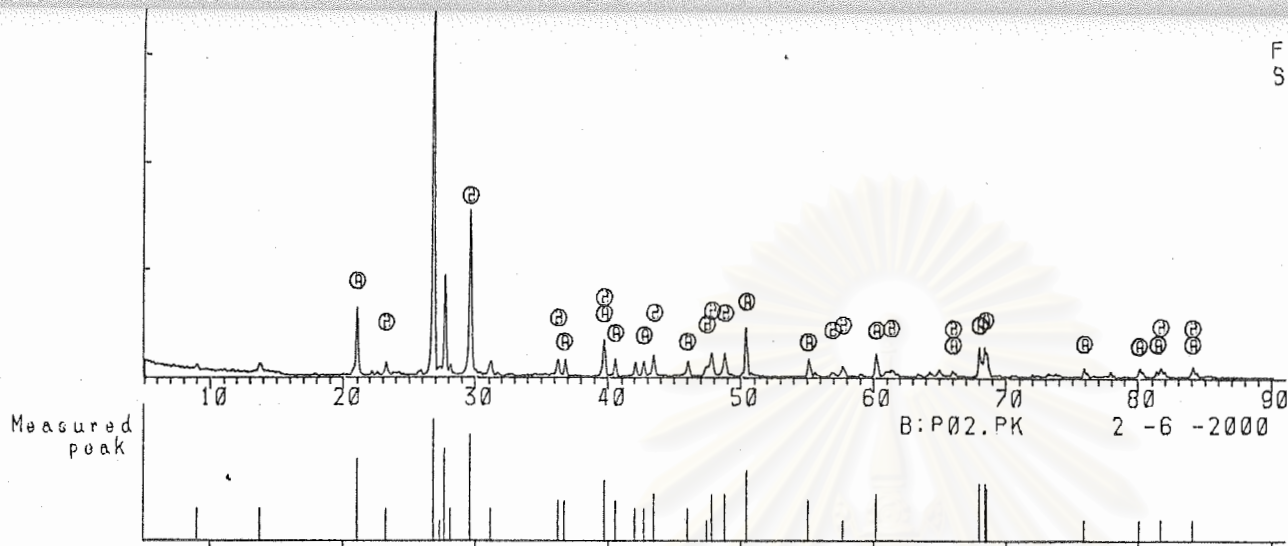
(B)

240027 CA C 03

CALCITE

C4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางแสดงข้อมูลค่าความเป็นกรดต่างของน้ำทิ้งที่เข้าและออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ที่อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)
1	7.4	10.7	7.4	10.5	7.7	9.0	7.4	9.9	7.3	9.3	7.4	8.6	7.3	9.3	7.5	8.8	7.4	8.0
2	7.5	10.5	7.5	10.3	7.5	8.9	7.6	9.9	7.5	9.4	7.4	8.5	7.5	9.2	7.7	8.8	7.4	8.0
3	7.5	10.3	7.3	10	7.4	8.9	7.5	9.6	7.5	9.2	7.4	8.4	7.7	9.0	7.4	8.6	7.5	7.9
4	7.6	10.0	7.4	9.8	7.4	8.8	7.4	9.5	7.4	9.0	7.4	8.5	7.3	8.8	7.5	8.6	7.4	8.0
5	7.7	10.0	7.4	9.8	7.5	8.8	7.4	9.6	7.5	9.0	7.4	8.4	7.5	8.8	7.6	8.5	7.5	8.0
6	7.4	10.0	7.4	9.8	7.3	8.5	7.8	9.5	7.7	9.0	7.6	8.4	7.3	8.9	7.5	8.3	7.4	7.9
7	7.4	9.9	7.5	9.3	7.6	8.3	7.3	9.5	7.6	9.0	7.7	8.2	7.3	8.8	7.6	8.3	7.3	7.9
ค่าเฉลี่ย	7.5	10.2	7.4	9.9	7.5	8.7	7.5	9.6	7.5	9.1	7.5	8.4	7.4	9.0	7.5	8.6	7.4	8.0
SD	0.11	0.30	0.07	0.39	0.13	0.25	0.17	0.18	0.17	0.17	0.12	0.12	0.16	0.20	0.10	0.21	0.07	0.05

ตารางแสดงข้อมูลของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งที่เข้าและออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)
1	24	2	10	1	16	3	42	3	42	5	30	4	12	2	16	3	11	3
2	36	2	14	2	21	6	4	0	40	5	14	1	32	5	21	6	18	3
3	12	1	6	0	17	3	40	2	48	1	12	1	10	1	17	3	40	5
4	24	1	14	2	19	3	28	1	42	3	18	3	18	3	19	3	30	5
5	24	2	20	2	18	2	12	1	34	2	34	3	6	1	18	2	22	8
6	12	1	12	1	33	6	14	1	22	2	10	1	22	5	33	6	14	2
7	50	5	44	5	24	5	8	1	18	2	26	3	34	6	24	5	12	3
ค่าเฉลี่ย	26	2.0	17.14	1.85	21.14	4.0	21.14	1.28	35.14	2.86	20.57	2.28	19.14	3.29	21.14	4.0	21.0	4.14
SD	13.41	1.41	12.59	1.57	5.87	1.63	15.48	0.95	11.19	1.57	9.43	1.25	10.82	2.06	5.87	1.63	10.66	2.04

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง (ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	92.8	88.1	86.7	91.7	90.0	87.5	83.3	81.3	72.7
2	100.0	87.5	92.9	94.4	85.7	90.3	84.4	71.4	83.3
3	95.0	97.9	91.7	91.7	100.0	92.0	90.0	82.4	87.5
4	96.4	92.9	83.3	95.8	85.7	72.7	83.3	84.2	83.3
5	91.7	94.1	91.2	91.7	90.0	93.8	83.3	88.9	63.6
6	92.8	90.9	90.0	91.7	91.7	92.3	77.3	81.8	85.7
7	87.5	88.9	88.5	90.0	88.6	96.7	82.4	79.2	75
ค่าเฉลี่ย	93.7	91.5	89.2	92.4	90.2	89.3	83.4	81.3	78.7
SD	3.93	3.75	3.31	1.97	4.85	7.86	3.71	5.32	8.62

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลซีไอดีในน้ำทิ้งที่เข้าและออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ของอัตรากรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตรากรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตรากรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)
1	85.7	28.3	109.1	78.9	52.2	31.4	99.5	53.2	72.1	43.2	110.6	80.0	112.3	77.1	72.8	44.3	114.3	74.0
2	82.8	41.0	112.3	64.5	46.4	22.2	72.1	18.0	84.6	59.2	58.4	40.0	91.6	36.4	89.9	35.5	58.9	13.9
3	104.0	59.2	110.0	39.2	82.1	20.2	85.0	50.5	69.0	13.8	66.7	34.2	107.5	44.0	73.4	35.6	96.6	38.5
4	102.4	26.9	96.4	40.0	60.3	23.5	74.6	29.6	110.2	81.8	74.4	48.7	116.4	58.0	94.6	61.9	80.2	53.3
5	75.6	22.9	80.0	43.2	92.1	46.1	102.4	54.5	95.4	35.0	115.3	57.5	103.1	67.6	91.5	74.8	44.5	26.7
6	68.9	27.1	101.3	33.5	80.0	52.1	85.0	56.7	63.0	31.5	64.9	40.8	87.6	48.1	110.1	85.2	94.7	62.5
7	72.7	34.2	113.5	50.5	86.6	57	64.3	38.2	71.0	36.3	93.5	60.4	110.1	77.2	70.6	39.1	104.3	54.1
ค่าเฉลี่ย	84.5	28.3	103.2	50.0	71.4	36.1	83.3	43.0	80.8	43.0	83.4	51.6	104.1	58.3	86.1	53.8	84.9	46.1
SD	13.94	12.50	11.97	16.23	18.10	15.38	14.11	14.76	16.93	21.84	23.04	15.71	10.77	16.26	14.55	20.27	25.16	20.95

ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง (ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	67.0	27.7	39.8	46.5	40.1	35.3	31.3	39.2	27.7
2	60.6	42.6	52.2	75.0	30.0	76.4	60.3	60.5	31.5
3	42.2	64.4	75.4	40.6	80.0	60.1	59.1	50.5	48.7
4	64.6	58.5	61.0	60.3	25.6	33.5	50.2	34.6	34.5
5	66.8	46.0	50.0	46.8	63.3	40.0	34.4	18.3	50.1
6	62.7	66.9	34.9	33.3	50.0	34.0	45.1	22.6	37.1
7	69.1	55.5	34.2	40.6	48.9	48.1	29.9	44.6	35.4
ค่าเฉลี่ย	61.8	51.6	49.6	49.0	48.3	46.8	44.3	38.6	37.9
SD	9.12	13.81	15.00	14.16	18.93	16.20	12.81	14.95	8.45

ตารางแสดงข้อมูลแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่เข้าและออกจากกระบวนการกรอง

ครั ง ที่	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)
1	16.46	12.68	13.29	10.22	12.84	10.34	18.66	13.29	16.90	12.20	19.07	14.40	18.67	16.11	15.15	13.68	15.25	14.14
2	16.56	13.08	13.51	10.40	13.51	10.75	18.27	12.90	18.20	12.10	18.20	10.85	18.27	16.28	19.25	18.42	16.02	14.67
3	18.24	14.32	13.13	10.40	14.92	11.32	15.86	11.84	14.67	11.70	19.71	15.56	15.25	13.78	17.06	16.04	18.92	16.93
4	17.15	14.23	14.97	12.72	16.77	13.65	16.03	11.10	14.91	12.27	18.45	14.20	16.04	14.67	17.81	16.61	19.32	18.06
5	15.98	11.82	17.14	13.92	16.68	12.82	17.05	12.20	15.18	11.23	19.88	16.88	17.00	15.41	15.04	13.23	16.32	14.67
6	16.12	12.73	16.12	12.20	15.24	12.82	16.02	13.37	16.50	13.02	17.24	12.58	15.14	14.32	17.9	14.52	18.84	17.52
7	15.71	11.78	16.88	13.50	13.13	10.24	14.89	11.90	15.71	11.93	17.05	13.90	14.75	13.68	15.71	15.08	16.20	14.90
ค่าเฉลี่ย	16.6	12.8	15.0	11.9	14.7	11.7	16.7	12.4	16.01	12.1	18.5	14.0	16.4	14.9	16.8	15.4	17.3	15.9
SD	0.86	1.02	1.73	1.57	1.63	1.37	1.37	0.84	1.26	0.55	1.12	1.95	1.57	1.06	1.60	0.34	0.41	0.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง ( ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	23.0	23.1	19.5	28.8	27.8	24.5	13.7	9.7	7.3
2	21.0	23.0	20.4	29.4	33.5	40.4	10.9	4.3	8.4
3	21.5	20.8	24.1	25.3	20.2	21.0	9.6	6.0	10.5
4	17.0	15.0	18.6	30.8	17.7	23.0	8.5	6.7	6.5
5	26.0	18.8	23.1	28.4	26.0	15.1	9.4	12.0	10.1
6	21.0	24.3	15.9	16.5	21.1	27.0	5.4	18.9	7.0
7	25.0	20.0	22.0	20.1	24.1	18.5	6.0	4.0	8.0
ค่าเฉลี่ย	22.1	20.7	20.5	25.6	24.3	24.2	9.1	8.8	8.2
SD	2.97	3.17	2.82	5.36	5.32	8.13	2.84	5.30	1.53

ตารางแสดงข้อมูลไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำทิ้งที่เข้าระบบและน้ำออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)
1	21.82	17.38	22.55	18.50	21.55	18.84	27.24	22.22	23.22	19.01	23.84	19.29	25.44	23.84	23.11	22.50	25.04	23.33	
2	22.06	16.72	21.55	16.34	21.43	17.65	27.10	21.46	23.48	18.26	24.60	19.20	23.19	20.56	24.80	23.46	25.04	24.58	
3	23.33	18.80	24.00	20.23	22.96	17.90	28.78	18.70	25.60	17.86	24.71	20.50	23.63	22.44	26.00	23.66	26.00	24.80	
4	19.78	16.41	26.10	21.14	23.67	18.50	25.43	17.65	23.21	18.53	24.09	17.74	24.14	21.48	24.88	22.22	28.88	26.40	
5	29.19	17.9	23.41	19.20	24.50	18.14	29.71	20.88	24.09	18.30	20.65	14.78	22.87	20.96	23.19	20.40	22.97	19.75	
6	23.63	17.24	20.12	14.40	24.24	19.44	26.90	18.29	20.61	14.61	26.00	20.60	20.45	18.47	24.48	22.08	23.68	20.91	
7	24.14	20.02	18.96	14.10	25.43	19.18	24.44	16.65	22.64	16.57	23.60	17.68	21.22	19.30	24.18	22.56	23.45	21.60	
ค่าเฉลี่ย	23.4	17.4	22.4	17.7	23.4	18.5	27.1	19.4	23.3	17.6	23.9	18.5	23.0	21.0	24.4	22.4	25.0	23.0	
SD	2.93	1.26	2.42	2.79	1.50	0.67	1.80	2.11	1.51	1.52	1.64	2.02	1.70	1.82	1.01	1.07	2.01	2.39	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง ( ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	20.3	18.0	12.6	18.4	18.1	19.1	6.3	2.6	6.8
2	24.2	24.2	17.6	20.8	22.2	22.0	11.3	5.4	1.8
3	19.4	15.7	22.0	35.0	30.2	17.0	5.0	9.0	4.6
4	17.0	19.0	21.8	30.6	20.2	26.4	11.0	10.7	8.6
5	38.7	18.0	26.0	29.7	24.0	28.4	8.4	12.0	14.0
6	27.0	28.4	19.8	32.0	29.1	20.8	9.7	9.8	11.7
7	17.1	25.6	24.6	31.9	26.8	25.1	9.0	6.7	7.9
ค่าเฉลี่ย	23.4	21.3	20.6	28.3	24.3	22.7	8.7	8.0	7.9
SD	7.68	4.76	4.51	6.23	4.54	4.11	2.33	3.29	4.11

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลไนเตรต-ไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่เข้าระบบและน้ำออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)
1	2.3	1.0	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.1	2.6	0.8	2.7	1.2	2.8	2.0	3.1	2.4	3.0	2.4
2	3.2	0.8	4.3	2.5	4.3	2.5	4.2	1.8	3.1	3.1	3.1	1.6	3.4	2.7	2.9	2.3	3.0	2.5
3	2.9	0.9	3.4	1.2	3.4	1.2	4.1	1.7	2.7	2.7	3.0	2.4	3.0	2.5	3.8	2.3	3.0	2.1
4	2.9	0.9	2.7	0.8	2.7	0.8	3.4	1.9	2.8	2.8	3.1	0.9	3.2	0.3	3.0	2.5	3.9	3.1
5	3.4	1.7	3.3	2.2	3.3	2.2	2.9	0.7	3.5	3.5	2.9	1.4	2.9	0.7	2.8	2.4	3.6	3.0
6	2.8	1.3	3.1	1.5	3.1	1.5	3.4	1.7	3.7	3.7	2.8	1.1	3.0	1.4	3.1	2.8	3.2	2.9
7	2.9	1.8	3.4	1.7	3.4	1.7	2.7	1.5	3.0	3.0	2.8	1.8	3.0	1.6	2.7	2.1	3.0	2.6
ค่าเฉลี่ย	2.9	1.0	3.3	1.6	3.4	1.48	3.0	1.5	3.0	2.8	2.9	1.5	3.0	1.6	3.1	2.4	3.2	2.7
SD	0.34	0.40	0.50	0.58	0.58	0.43	0.41	0.43	0.41	0.95	0.15	0.50	0.20	0.89	0.36	0.22	0.36	0.36

ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง ( ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	56.5	50.0	76.7	63.3	69.2	55.6	28.6	22.6	20.0
2	75.0	41.9	50.0	57.1	61.3	46.7	20.6	20.7	16.7
3	68.9	64.7	79.3	58.5	48.1	22.6	16.7	39.5	30.0
4	68.9	70.4	33.3	44.1	71.4	70.0	59.4	16.7	20.5
5	50.0	33.3	15.6	75.9	34.3	50.0	75.9	14.3	16.7
6	53.6	51.6	53.1	50.0	43.2	60.7	53.3	9.7	9.4
7	37.9	50.0	45.6	44.4	33.3	40.0	46.7	22.2	13.3
ค่าเฉลี่ย	58.7	51.7	50.5	56.2	51.5	49.4	43.0	20.8	18.1
SD	12.99	12.72	22.58	11.32	15.88	15.30	21.88	9.46	6.50

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการกรอง

ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกรอง ( ร้อยละ )								
	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)			อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)		
	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.	0.4-0.6 มม.	0.7-1.2 มม.	1.6-2.0 มม.
1	70.4	62.1	60.0	62.5	81.6	63.5	46.7	48.8	34.4
2	85.7	72.5	69.6	60.9	45.8	67.2	54.5	30.6	40.9
3	75.0	60.0	46.4	62.2	62.5	34.4	57.7	59.3	42.9
4	73.2	70.6	58.6	51.1	26.7	66.7	44.6	45.6	48.5
5	65.3	72.7	57.7	43.1	63.6	27.8	55.6	46.4	26.8
6	62.2	64.3	61.6	74.6	63.2	69.0	22.7	38.1	39.4
7	55.2	54.5	63.2	71.4	53.1	46.7	29.4	23.7	42.2
ค่าเฉลี่ย	69.6	65.2	59.6	60.8	56.6	53.6	44.4	41.8	39.3
SD	9.86	6.96	7.02	10.9	17.20	17.19	13.6	12.0	6.95

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำที่เข้าสู่ระบบและน้ำออกจากกระบวนการกรอง

ครั้งที่	อัตราการกรอง 1 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 5 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)						อัตราการกรอง 10 (ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.)					
	0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.		0.4-0.6 มม.		0.7-1.2 มม.		1.6-2.0 มม.	
	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)
1	8.1		6.6	2.5	6.3	2.3	4.9	0.9	1.6	0.6	3.0	1.2	9.2	4.9	8.0	4.1	3.2	2.1
2	6.3		4.0	1.1	4.1	2.0	2.4	1.3	4.6	1.8	2.3	0.7	5.5	2.5	4.9	3.4	4.4	2.6
3	5.2		2.5	1.0	6.1	2.1	2.4	0.9	3.7	1.4	2.8	1.5	5.2	2.2	5.9	2.4	7.0	4.0
4	4.1		1.7	0.5	3.2	1.3	1.5	1.1	9.0	4.4	2.9	1.2	5.6	3.1	4.6	2.5	6.8	3.5
5	7.2		4.4	1.2	3.9	1.3	2.2	1.8	5.8	3.3	2.6	1.1	7.2	3.2	6.9	3.7	7.1	5.2
6	3.7		1.4	0.5	1.8	0.9	3.8	1.4	5.9	1.5	7.3	2.8	4.4	3.4	4.2	2.6	3.3	2.0
7	6.7		1.1	0.5	2.9	1.6	4.9	2.3	5.6	1.6	6.8	2.5	5.1	3.6	3.8	2.9	6.5	3.3
ค่าเฉลี่ย	5.9	1.8	3.1	1.04	4.04	2.0	3.16	2.32	5.18	2.08	3.96	1.57	6.03	3.27	5.47	3.08	5.47	3.24
SD	1.63	0.82	2.00	0.71	1.65	0.51	1.37	1.64	2.27	1.30	2.13	0.78	1.63	0.87	1.53	0.66	1.77	1.14

ตารางแสดง ข้อมูลสภาพความเป็นกรดต่างของน้ำทิ้งก่อนเข้าและออกจากระบบ เมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และขนาดเศษคอนกรีต 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ค่าความเป็นกรดต่าง	
		น้ำเข้า	น้ำออก
0.5	1	7.4	8.1
	2	7.4	7.9
	3	7.5	8.2
	4	7.7	8.2
	5	7.6	8.0
	ค่าเฉลี่ย	7.5	8.1
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	0.13	0.13
1.0	1	7.4	8.4
	2	7.4	8.3
	3	7.5	8.4
	4	7.7	8.3
	5	7.6	8.1
	ค่าเฉลี่ย	7.5	8.3
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	0.13	0.12
1.5	1	7.4	8.5
	2	7.4	8.4
	3	7.5	8.4
	4	7.7	8.2
	5	7.6	8.2
	ค่าเฉลี่ย	7.5	8.3
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	0.13	0.13

ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัด ของแข็งแขวนลอยของกระบวนการกรองเมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และขนาดเศษคอนกรีต 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ของแข็งแขวนลอย		
		น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	21	8	61.9
	2	16	2	87.5
	3	14	2	85.7
	4	18	4	77.8
	5	20	6	70.0
	ค่าเฉลี่ย	17.8	4.4	76.6
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	2.86	2.61	10.8
1.0	1	21	7	66.7
	2	16	1	93.8
	3	14	2	85.7
	4	18	2	88.9
	5	20	3	85.0
	ค่าเฉลี่ย	17.8	3.0	84.0
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	2.86	2.34	10.29
1.5	1	21	2	90.5
	2	16	1	93.8
	3	14	1	92.8
	4	18	2	88.9
	5	20	3	85.0
	ค่าเฉลี่ย	17.8	1.8	90.2
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	2.86	0.84	3.48

ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัด บีโอดีของกระบวนการกรอง เมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.  
ม./ตร.ม.-ชม. และเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	บีโอดี		
		น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	68	10	85.3
	2	48	13	72.9
	3	30	11	63.3
	4	45	17	62.2
	5	36	14	61.1
	ค่าเฉลี่ย	45.4	13.0	69.0
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	14.52	2.74	10.27
1.0	1	68	10	85.3
	2	48	11	77.1
	3	30	10	66.7
	4	45	14	68.9
	5	36	12	66.7
	ค่าเฉลี่ย	45.4	11.4	72.9
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	14.52	1.67	8.13
1.5	1	68	8	88.2
	2	48	14	70.8
	3	30	10	66.7
	4	45	20	55.6
	5	36	12	66.7
	ค่าเฉลี่ย	45.4	12.8	69.6
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	14.52	4.60	11.83



ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของกระบวนการกรองเมื่อใช้ อัดรกรอง 5 ลบ.ม./  
 ตร.ม.-ชม. และเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ซีโอดี		
		น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก (มก./ ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	118.0	75.5	36.0
	2	104.0	52.0	36.5
	3	60.0	48.0	20.0
	4	82.0	50.3	38.6
	5	89.0	44.9	49.6
	ค่าเฉลี่ย	90.6	54.1	36.1
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	22.0	12.23	10.58
1.0	1	118.0	79.6	32.5
	2	104.0	72.8	30.0
	3	60.0	18.0	70.0
	4	82.0	60.8	25.8
	5	89.0	41.6	53.2
	ค่าเฉลี่ย	90.6	54.6	42.3
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	22.0	25.0	18.75
1.5	1	118.0	70.0	40.7
	2	104.0	72.8	30.0
	3	60.0	12.0	80.0
	4	82.0	60.8	25.8
	5	89.0	37.4	58.0
	ค่าเฉลี่ย	90.6	50.6	46.9
	ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย	22.0	25.7	22.3

ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรด-ไนโตรเจนของกระบวนการกรองเมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และขนาดเศษคอนกรีต 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ไนเตรด-ไนโตรเจน		
		น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	2.0	0.8	60.0
	2	1.9	1.3	31.6
	3	2.2	1.1	50.0
	ค่าเฉลี่ย	2.0	1.1	47.2
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	0.15	0.25	20.08
1.0	1	2.0	0.6	70.0
	2	1.9	1.6	15.7
	3	2.2	1.1	50.0
	ค่าเฉลี่ย	2.0	1.1	45.2
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	0.15	0.5	27.46
1.5	1	2.0	0.7	65.0
	2	1.9	0.6	68.4
	3	2.2	1.1	50.0
	ค่าเฉลี่ย	2.0	0.8	61.1
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	0.15	0.26	9.79

ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของกระบวนการกรอง เมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ฟอสฟอรัสทั้งหมด		
		น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	2.0	55.6
	3	3.8	2.0	47.4
	ค่าเฉลี่ย	4.9	2.1	56.0
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.11	6.71
1.0	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	1.6	64.4
	3	3.8	1.9	50.0
	ค่าเฉลี่ย	4.9	1.9	59.8
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.3	8.52
1.5	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	1.8	60.0
	3	3.8	1.9	50.0
	ค่าเฉลี่ย	4.9	2.0	58.4
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.21	7.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดง ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของกระบวนการกรอง เมื่อใช้ อัตรากรอง 5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และเศษคอนกรีตขนาด 1.6-2.0 มม.

ระดับความลึก (ม.)	ครั้งที่	ฟอสฟอรัสทั้งหมด		
		น้ำเข้า (มก./ ล.)	น้ำออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0.5	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	2.0	55.6
	3	3.8	2.0	47.4
	ค่าเฉลี่ย	4.9	2.1	56.0
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.11	6.71
1.0	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	1.6	64.4
	3	3.8	1.9	50.0
	ค่าเฉลี่ย	4.9	1.9	59.8
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.3	8.52
1.5	1	6.3	2.2	65.1
	2	4.5	1.8	60.0
	3	3.8	1.9	50.0
	ค่าเฉลี่ย	4.9	2.0	58.4
	ค่าเบี่ยงเบน เฉลี่ย	1.29	0.21	7.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OBS	FLOW	SIZE	REP	PHIN	PHOUT	PSS	COD	NH3	TKN	NO3	PO4
1	1	1	1	7.4	10.7	92.8	67.0	23.0	20.3	56.5	70.4
2	1	2	1	7.4	10.5	88.1	27.7	23.1	18.0	50.0	62.1
3	1	3	1	7.7	9.0	86.7	39.8	19.5	12.6	76.7	60.0
4	1	1	2	7.5	10.5	100.0	60.6	21.0	24.3	75.0	85.7
5	1	2	2	7.5	10.3	87.5	42.6	23.0	24.2	41.9	72.5
6	1	3	2	7.5	8.9	92.9	52.2	20.4	17.6	50.0	69.6
7	1	1	3	7.5	10.3	95.0	42.2	21.5	19.4	68.9	75.0
8	1	2	3	7.3	10.0	97.9	64.4	20.8	15.7	64.7	60.0
9	1	3	3	7.4	8.9	91.7	75.4	24.1	22.0	79.3	46.4
10	1	1	4	7.6	10.0	96.4	64.6	17.0	17.0	68.9	73.2
11	1	2	4	7.4	9.8	92.9	58.5	15.0	19.0	70.4	70.6
12	1	3	4	7.4	8.8	83.3	61.0	18.6	21.8	33.3	58.6
13	1	1	5	7.7	10.0	91.7	66.8	26.0	38.7	50.0	65.3
14	1	2	5	7.4	9.8	94.1	46.0	18.8	18.0	33.3	72.7
15	1	3	5	7.5	8.8	91.2	50.0	23.1	26.0	15.6	57.7
16	1	1	6	7.4	10.0	92.8	62.7	21.0	27.0	53.6	62.2
17	1	2	6	7.4	9.8	90.9	66.9	24.3	28.4	51.6	64.3
18	1	3	6	7.3	8.5	90.0	34.9	15.9	19.8	53.1	61.6
19	1	1	7	7.4	9.9	87.5	69.1	25.0	17.1	37.9	55.2
20	1	2	7	7.5	9.3	88.9	55.5	20.0	25.6	50.0	54.5
21	1	3	7	7.6	8.3	88.5	34.2	22.0	24.6	45.6	63.2
22	2	1	1	7.4	9.9	91.7	46.5	28.8	18.4	63.3	62.5
23	2	2	1	7.3	9.3	90.0	40.1	27.8	18.1	69.2	81.6
24	2	3	1	7.4	8.6	87.5	35.3	24.5	19.1	55.6	63.5
25	2	1	2	7.6	9.9	94.4	75.0	29.4	20.8	57.1	60.9
26	2	2	2	7.5	9.4	85.7	30.0	33.5	22.2	61.3	45.8
27	2	3	2	7.4	8.5	90.3	76.4	40.4	22.0	46.7	67.2
28	2	1	3	7.5	9.6	91.7	40.6	25.3	35.0	58.5	62.2
29	2	2	3	7.5	9.2	100.0	80.0	20.2	30.2	48.1	62.5
30	2	3	3	7.4	8.4	92.0	60.1	21.0	17.0	22.6	34.4
31	2	1	4	7.4	9.5	95.8	60.3	30.8	30.6	44.1	51.1
32	2	2	4	7.4	9.0	85.7	25.6	17.7	20.2	71.4	26.7
33	2	3	4	7.4	8.5	72.7	33.5	23.0	26.4	70.0	66.7
34	2	1	5	7.4	9.6	91.7	46.8	28.4	29.7	75.9	43.1
35	2	2	5	7.5	9.0	90.0	63.3	26.0	24.0	34.3	63.6
36	2	3	5	7.4	8.4	93.8	40.0	15.1	28.4	50.0	27.8
37	2	1	6	7.8	9.5	91.7	33.3	16.5	32.0	50.0	74.6
38	2	2	6	7.7	9.0	91.7	50.0	21.1	29.1	43.2	63.2
39	2	3	6	7.6	8.4	92.3	34.0	27.0	20.8	60.7	69.0
40	2	1	7	7.3	9.5	90.0	40.6	20.1	31.9	44.4	71.4
41	2	2	7	7.6	9.0	88.6	48.9	24.1	26.8	33.3	53.1
42	2	3	7	7.7	8.2	96.7	48.1	18.5	25.1	40.0	46.7
43	3	1	1	7.3	9.3	83.3	31.3	13.7	6.3	28.6	46.7
44	3	2	1	7.5	8.8	81.3	39.2	9.7	2.6	22.6	48.8
45	3	3	1	7.4	8.0	72.7	27.7	7.3	6.8	20.0	34.4
46	3	1	2	7.5	9.2	84.4	60.3	10.9	11.3	20.6	54.5
47	3	2	2	7.7	8.8	71.4	60.5	4.3	5.4	20.7	30.6
48	3	3	2	7.4	8.0	83.3	31.5	8.4	1.8	16.7	40.9
49	3	1	3	7.7	9.0	90.0	59.1	9.6	5.0	16.7	57.7
50	3	2	3	7.4	8.6	82.4	50.5	6.0	9.0	39.5	59.3
51	3	3	3	7.5	7.9	87.5	48.7	10.5	4.6	30.0	42.9
52	3	1	4	7.3	8.8	83.3	50.2	8.5	11.0	59.4	44.6
53	3	2	4	7.5	8.6	84.2	34.6	6.7	10.7	16.7	45.6
54	3	3	4	7.4	8.0	83.3	34.5	6.5	8.6	20.5	48.5
55	3	1	5	7.5	8.8	83.3	34.4	9.4	8.4	75.9	55.6
56	3	2	5	7.6	8.5	88.9	18.3	12.0	12.0	14.3	46.4
57	3	3	5	7.5	8.0	63.6	50.1	10.1	14.0	16.7	26.8
58	3	1	6	7.3	8.9	77.3	45.1	5.4	9.7	53.3	22.7
59	3	2	6	7.5	8.3	81.8	22.6	18.9	9.8	9.7	38.1
60	3	3	6	7.4	7.9	85.7	37.1	7.0	11.7	9.4	39.4
61	3	1	7	7.3	8.8	82.4	29.9	6.0	9.0	46.7	29.4
62	3	2	7	7.6	8.3	79.2	44.6	4.0	6.7	22.2	23.7
63	3	3	7	7.3	7.9	75.0	35.4	8.0	7.9	13.3	42.2

FLOW 3 1 2 3  
 SIZE 3 1 2 3

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	30.62285714	3.82785714	72.64	0.0001
Error	54	2.84571429	0.05269841		
Corrected Total	62	33.46857143			
	R-Square	C.V.	Root MSE	PHOUT Mean	
	0.914974	2.533257	0.229561	9.06190476	

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	13.37428571	6.68714286	126.89	0.0001
SIZE	2	16.49142857	8.24571429	156.47	0.0001
FLOW*SIZE	4	0.75714286	0.18928571	3.59	0.0114
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	13.37428571	6.68714286	126.89	0.0001
SIZE	2	16.49142857	8.24571429	156.47	0.0001
FLOW*SIZE	4	0.75714286	0.18928571	3.59	0.0114

Duncan's Multiple Range Test for variable: PHOUT

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 0.052698

Number of Means 2 3  
 Critical Range 0.142 0.149

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	9.6238	21	1
B	9.0667	21	2
Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
C	8.4952	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: PHOUT

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 0.052698

Number of Means 2 3  
 Critical Range 0.142 0.149

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	9.6048	21	1
B	9.2048	21	2
Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
C	8.3762	21	3

----- FLOW=1 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
SIZE	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	8.40666667	4.20333333	40.87	0.0001
Error	18	1.85142857	0.10285714		
Corrected Total	20	10.25809524			

R-Square	C.V.	Root MSE	PHOUT Mean
0.819515	3.332500	0.320713	9.62380952

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	8.40666667	4.20333333	40.87	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	8.40666667	4.20333333	40.87	0.0001

Duncan's Multiple Range Test for variable: PHOUT

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 0.102857

Number of Means	2	3
Critical Range	0.360	0.378

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	10.200	7	1
A	9.929	7	2
B	8.743	7	3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

----- FLOW=2 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
SIZE	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

----- FLOW=2 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	5.20095238	2.60047619	100.51	0.0001
Error	18	0.46571429	0.02587302		
Corrected Total	20	5.66666667			

R-Square	C.V.	Root MSE	PHOUT Mean
0.917815	1.774091	0.160851	9.06666667

----- FLOW=2 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	5.20095238	2.60047619	100.51	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	5.20095238	2.60047619	100.51	0.0001

----- FLOW=2 -----

General Linear Models Procedure

Duncan's Multiple Range Test for variable: PHOUT

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 0.025873

Number of Means	2	3
Critical Range	0.180	0.189

Means with the same letter are not significantly different.

----- FLOW=2 -----

General Linear Models Procedure

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	9.6429	7	1
B	9.1286	7	2
C	8.4286	7	3



----- FLOW=3 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
SIZE	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

----- FLOW=3 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	3.64095238	1.82047619	61.99	0.0001
Error	18	0.52857143	0.02936508		
Corrected Total	20	4.16952381			

R-Square	C.V.	Root MSE	PHOUT Mean
0.873230	2.017159	0.171362	8.49523810

----- FLOW=3 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PHOUT

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	3.64095238	1.82047619	61.99	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SIZE	2	3.64095238	1.82047619	61.99	0.0001

----- FLOW=3 -----

General Linear Models Procedure

Duncan's Multiple Range Test for variable: PHOUT

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 0.029365

Number of Means 2 3  
Critical Range 0.192 0.202

Means with the same letter are not significantly different.

----- FLOW=3 -----

General Linear Models Procedure

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	8.9714	7	1
B	8.5571	7	2
C	7.9571	7	3

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	1567.283175	195.910397	7.16	0.0001
Error	54	1478.282857	27.375608		
Corrected Total	62	3045.566032			
	R-Square	C.V.	Root MSE		PSS Mean
	0.514611	5.961671	5.232171		87.7634921

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	1381.501270	690.750635	25.23	0.0001
SIZE	2	178.388889	89.194444	3.26	0.0461
FLOW*SIZE	4	7.393016	1.848254	0.07	0.9914

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	1381.501270	690.750635	25.23	0.0001
SIZE	2	178.388889	89.194444	3.26	0.0461
FLOW*SIZE	4	7.393016	1.848254	0.07	0.9914

Duncan's Multiple Range Test for variable: PSS

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 27.37561

Number of Means 2 3  
Critical Range 3.239 3.406

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	91.467	21	1
A			
Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
B	81.157	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: PSS

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 27.37561

Number of Means 2 3  
Critical Range 3.239 3.406

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	89.867	21	1
A			
Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
B			
B	85.748	21	3

----- SIZE=1 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
FLOW	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

----- SIZE=1 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	441.2609524	220.6304762	19.98	0.0001
Error	18	198.7857143	11.0436508		
Corrected Total	20	640.0466667			

R-Square	C.V.	Root MSE	PSS Mean
0.689420	3.697922	3.323199	89.8666667

----- SIZE=1 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	441.2609524	220.6304762	19.98	0.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	441.2609524	220.6304762	19.98	0.0001

----- SIZE=1 -----

General Linear Models Procedure

Duncan's Multiple Range Test for variable: PSS

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 11.04365

Number of Means	2	3
Critical Range	3.726	3.912

Means with the same letter are not significantly different.

----- SIZE=1 -----

General Linear Models Procedure

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	93.743	7	1
A			

A	92.429	7	2
B	83.429	7	3

----- SIZE=2 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
FLOW	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

----- SIZE=2 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	430.2580952	215.1290476	9.78	0.0013
Error	18	395.8200000	21.9900000		
Corrected Total	20	826.0780952			
	R-Square	C.V.	Root MSE		PSS Mean
	0.520844	5.348487	4.689350		87.6761905

----- SIZE=2 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	430.2580952	215.1290476	9.78	0.0013
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	430.2580952	215.1290476	9.78	0.0013

----- SIZE=2 -----

General Linear Models Procedure

Duncan's Multiple Range Test for variable: PSS

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 21.99

Number of Means    2    3  
Critical Range    5.258 5.520

Means with the same letter are not significantly different.

----- SIZE=2 -----

General Linear Models Procedure

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	91.471	7	1
A			
A	90.243	7	2
B	81.314	7	3

----- SIZE=3 -----

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
FLOW	3	1 2 3

Number of observations in by group = 21

----- SIZE=3 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	517.3752381	258.6876190	5.27	0.0158
Error	18	883.6771429	49.0931746		
Corrected Total	20	1401.0523810			

R-Square	C.V.	Root MSE	PSS Mean
0.369276	8.171250	7.006652	85.7476190

----- SIZE=3 -----

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PSS

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	517.3752381	258.6876190	5.27	0.0158

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	517.3752381	258.6876190	5.27	0.0158

----- SIZE=3 -----

General Linear Models Procedure

Duncan's Multiple Range Test for variable: PSS

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 18 MSE= 49.09317

Number of Means	2	3
Critical Range	7.856	8.248

Means with the same letter are not significantly different.

----- SIZE=3 -----

General Linear Models Procedure

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	89.329	7	2
A	89.186	7	1
B	78.729	7	3

Dependent Variable: NH3

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	2982.631746	372.828968	17.77	0.0001
Error	54	1133.137143	20.984021		
Corrected Total	62	4115.768889			
	R-Square	C.V.	Root MSE		NH3 Mean
	0.724684	25.20018	4.580832		18.1777778

Dependent Variable: NH3

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	2961.792698	1480.896349	70.57	0.0001
SIZE	2	18.194603	9.097302	0.43	0.6504
FLOW*SIZE	4	2.644444	0.661111	0.03	0.9980
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	2961.792698	1480.896349	70.57	0.0001
SIZE	2	18.194603	9.097302	0.43	0.6504
FLOW*SIZE	4	2.644444	0.661111	0.03	0.9980

Duncan's Multiple Range Test for variable: NH3

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 20.98402

Number of Means 2 3  
Critical Range 2.836 2.982

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	24.724	21	2
B	21.100	21	1

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
C	8.710	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: NH3

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 20.98402

Number of Means 2 3  
Critical Range 2.836 2.982

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	18.919	21	1
A	17.952	21	2

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	17.662	21	3

Dependent Variable: COD

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	2893.725714	361.715714	1.83	0.0915
Error	54	10677.988571	197.740529		
Corrected Total	62	13571.714286			
	R-Square	C.V.	Root MSE		COD Mean
	0.213217	29.56869	14.06202		47.5571429

Dependent Variable: COD

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	2099.869524	1049.934762	5.31	0.0078
SIZE	2	570.663810	285.331905	1.44	0.2452
FLOW*SIZE	4	223.192381	55.798095	0.28	0.8883
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	2099.869524	1049.934762	5.31	0.0078
SIZE	2	570.663810	285.331905	1.44	0.2452
FLOW*SIZE	4	223.192381	55.798095	0.28	0.8883

Duncan's Multiple Range Test for variable: COD

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 197.7405

Number of Means 2 3  
Critical Range 8.705 9.153

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	54.386	21	1
A			
B	48.019	21	2

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
B			
B	40.267	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: COD

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 197.7405

Number of Means 2 3  
Critical Range 8.705 9.153

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	51.733	21	1
A			

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A			
A	44.757	21	3

Dependent Variable: TKN

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	3522.750794	440.343849	18.73	0.0001
Error	54	1269.645714	23.511958		
Corrected Total	62	4792.396508			
	R-Square	C.V.	Root MSE		TKN Mean
	0.735071	26.39833	4.848913		18.3682540

Dependent Variable: TKN

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	3372.853651	1686.426825	71.73	0.0001
SIZE	2	105.630794	52.815397	2.25	0.1156
FLOW*SIZE	4	44.266349	11.066587	0.47	0.7570
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	3372.853651	1686.426825	71.73	0.0001
SIZE	2	105.630794	52.815397	2.25	0.1156
FLOW*SIZE	4	44.266349	11.066587	0.47	0.7570

Duncan's Multiple Range Test for variable: TKN

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 23.51196

Number of Means 2 3  
Critical Range 3.002 3.156

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	25.133	21	2
B	21.767	21	1
Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
C	8.205	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: TKN

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 23.51196

Number of Means 2 3  
Critical Range 3.002 3.156

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	20.138	21	1
A	17.890	21	2
Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	17.076	21	3



Dependent Variable: NO3

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	12319.93746	1539.99218	6.72	0.0001
Error	54	12381.80857	229.29275		
Corrected Total	62	24701.74603			

R-Square	C.V.	Root MSE	NO3 Mean
0.498748	34.07652	15.14242	44.4365079

Dependent Variable: NO3

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	9256.854603	4628.427302	20.19	0.0001
SIZE	2	2159.628889	1079.814444	4.71	0.0130
FLOW*SIZE	4	903.453968	225.863492	0.99	0.4235

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	9256.854603	4628.427302	20.19	0.0001
SIZE	2	2159.628889	1079.814444	4.71	0.0130
FLOW*SIZE	4	903.453968	225.863492	0.99	0.4235

Duncan's Multiple Range Test for variable: NO3

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 229.2928

Number of Means 2 3  
Critical Range 9.374 9.856

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	53.633	21	1
A			
Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
B	27.310	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: NO3

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 229.2928

Number of Means 2 3  
Critical Range 9.374 9.856

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	52.633	21	1
B	41.352	21	2
Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
B			
B	39.324	21	3

Dependent Variable: PO4

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	6351.586984	793.948373	5.58	0.0001
Error	54	7685.065714	142.316032		
Corrected Total	62	14036.652698			

R-Square	C.V.	Root MSE	PO4 Mean
0.452500	21.86566	11.92963	54.5587302

Dependent Variable: PO4

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	5723.677460	2861.838730	20.11	0.0001
SIZE	2	583.148889	291.574444	2.05	0.1388
FLOW*SIZE	4	44.760635	11.190159	0.08	0.9885

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLOW	2	5723.677460	2861.838730	20.11	0.0001
SIZE	2	583.148889	291.574444	2.05	0.1388
FLOW*SIZE	4	44.760635	11.190159	0.08	0.9885

Duncan's Multiple Range Test for variable: PO4

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 142.316

Number of Means 2 3  
Critical Range 7.385 7.765

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
A	64.800	21	1
B	57.029	21	2

Duncan Grouping	Mean	N	FLOW
C	41.848	21	3

Duncan's Multiple Range Test for variable: PO4

NOTE: This test controls the type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate

Alpha= 0.05 df= 54 MSE= 142.316

Number of Means 2 3  
Critical Range 7.385 7.765

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	SIZE
A	58.286	21	1
A	50.833	21	3

## ประวัติผู้วิจัย

นางสาวพูนศิริ สิ้นธุรัตน์เกิดที่จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อวันที่ 4 เมษายน 2514 ได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เมื่อปีพ.ศ.2536 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย