

Research Article

# การลดน้ำสูญเสียในโรงงานผลิตน้ำประปาด้วยการควบคุมความเข้มข้นของตะกอน

## Water loss reduction in a water treatment plant by sludge concentration control

กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์<sup>1\*</sup> และ มนตรี หลากจิตร์<sup>1</sup>

Kanokporn Sripathomswat<sup>1\*</sup> and Montree Lakchit<sup>1</sup>

<sup>1</sup> หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยีวิศวกรรม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

<sup>1</sup> Engineering Technology and Management Program, Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

\*E-mail: kanokporn.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 10/07/2018; Accepted: 08/11/2018

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อควบคุมความเข้มข้นของตะกอน ในถังตกตะกอนแบบควบคุมชั้นตะกอน (superpulsator) โดยทำการศึกษาในระบบผลิตของโรงงานผลิตน้ำประปาแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ทำการเก็บข้อมูลและทำการทดลองในช่วงเวลาของฤดูฝนในประเทศไทย เป้าหมายเพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มข้นของตะกอน ส่งผลให้สามารถลดน้ำสูญเสียเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำประปาให้ได้มากขึ้น นอกจากนี้ สามารถลดปัญหาการเสียหายของระบบผลิตจากระบบระบายตะกอนตันได้ภายใต้เงื่อนไขของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบในช่วงเวลาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อัตราการจ่ายสารส้ม และอัตราการกระแทกน้ำ แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในการทดลองแต่ละครั้งจะปล่อยให้ระบบทำงาน 40 นาทีแล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำระบายตะกอนทิ้งไว้ 20 นาทีแล้วอ่านค่าของระดับตะกอนที่แยกตัวออกจากน้ำ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความเข้มข้นของตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากออกแบบการทดลองพบว่าปัจจัยที่เหมาะสม คือ อัตราการจ่ายสารส้ม 100 ลิตร/ชั่วโมง และอัตราการกระแทกน้ำ 65 ครั้ง/ชั่วโมง เมื่อนำปัจจัย

ดังกล่าวไปใช้ในโรงงานผลิตน้ำกรณศึกษา พบว่าสามารถลดน้ำสูญเสียได้ 38% ลดงานแจ้งซ่อมจากปัญหาระบบระบายตะกอนตันได้ 100%

**คำสำคัญ:** การลดน้ำสูญเสีย, การออกแบบการทดลอง, ความเข้มข้นของตะกอน

### Abstract

This research aimed to determine the optimum level of concentration of sludge in the superpulsator settling tank at a tap water treatment plant in Bangkok in order to control sludge concentration applying in rainy season of Thailand. This could reduce the water loss and sludge blockage problems during conditions of that time. The reduction of water loss is an effective way to improve efficiency of the tap water treatment. We applied the full factorial design of experiment which consisted of two main factors, such as alum rate and impact rate. Each factor comprised of three levels. A factorial experiment was then conducted with three replications. After running the system for 40 minutes, the water was drained and sludge samples were collected. After the samples were left for 20 minutes, we then read the value of sludge separating from the water. The results were analyzed at 95% confidence interval. According to the results, both factors significantly affected the sludge concentration. The optimum condition of alum rate was 100 litres per hour and the optimum condition of impact rate was 65 times per hour. When the system was controlled by these optimal factors, we could reduce water loss and sludge blockage problems at 38% and 100%, respectively.

**Keywords:** water loss reduction, design of experiment, sludge concentration

### บทนำ

เนื่องจากความต้องการใช้น้ำประปาที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่งผลให้ควรต้องเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำประปา ทั้งในส่วนของการขยายกำลังการผลิตและการผลิตน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้แหล่งน้ำดิบ และปริมาณน้ำดิบในแต่ละฤดูกาลที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรอย่างหนึ่ง การลดน้ำสูญเสียจึงเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตได้มากขึ้น โดยใช้น้ำดิบตามข้อจำกัดที่พบ งานวิจัยนี้ดำเนินการในระบบผลิตของโรงงานผลิตน้ำประปาแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร การควบคุมความเข้มข้นของตะกอนให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จะสามารถลดปัญหาการเกิดน้ำสูญเสียที่ถูกระบายทิ้งไปกับตะกอนได้ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปัญหาระบบระบายตะกอนอุดตัน (Udomsinrot, 1993) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง ในการควบคุมความเข้มข้นของตะกอนของถัง

ตกตะกอนแบบควบคุมหุ่นยนต์ (superpulsator) เพื่อให้คุณภาพน้ำประปาที่จ่ายจากระบบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ (Laurent, 1995)

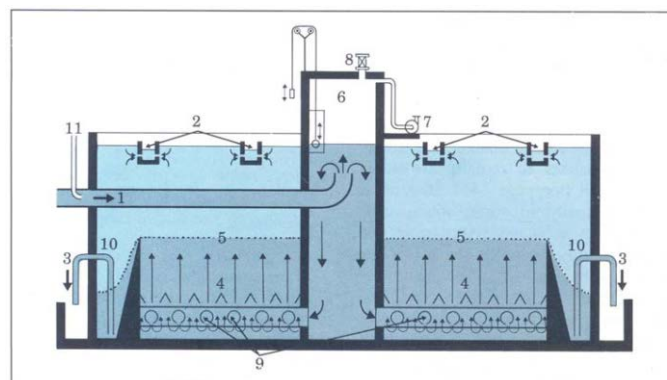
**ตารางที่ 1.** ความต้องการใช้น้ำประปาในช่วงปีงบประมาณ 2556 ถึง 2560 (Metropolitan Waterworks Authority, 2018a)

| ปีงบประมาณ | ปริมาณน้ำผลิตจ่าย (ล้านลูกบาศก์เมตร) | จำนวนผู้ใช้น้ำ (ราย) |
|------------|--------------------------------------|----------------------|
| 2556       | 1,804.5                              | 2,113,674            |
| 2557       | 1,797.8                              | 2,171,371            |
| 2558       | 1,835.1                              | 2,226,707            |
| 2559       | 1,965.9                              | 2,281,058            |
| 2560       | 2,063.8                              | 2,328,598            |

จากการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานการศึกษาเบื้องต้น พบว่าพนักงานผู้ควบคุมระบบไม่มีแนวทางในการปรับค่าควบคุมระบบความเข้มข้นของตะกอนที่ชัดเจน โดยหากความเข้มข้นของตะกอนไม่อยู่ในเกณฑ์ควบคุม นั่นคือความเข้มข้นของตะกอนประมาณ 70% ถึง 80% (ตามมาตรฐานการควบคุมระบบ) (Laurent, 1995) ก็จะทำให้การปรับอัตราการจ่ายสารส้มและหรือปรับอัตราการกระแทกน้ำโดยใช้ประสบการณ์ของแต่ละบุคคล นอกจากนี้ หากใช้เวลาปรับระบบนานเกินไปก็จะส่งผลให้มีตะกอนสะสมตามท่อระบาย เกิดปัญหาอุดตันจนระบบผลิตอาจหยุดทำงานไม่สามารถผลิตได้จนกว่าจะมีการซ่อมแซมระบบระบายตะกอน ในอีกทางหนึ่งพบว่าการเกิดน้ำสูญเสียมากขึ้นเรื่อย ๆ จะส่งผลถึงปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้ในบางช่วงเวลาลดลง อาจทำให้ไม่สามารถสูบน้ำประปาให้เพียงพอต่อความต้องการได้

การทำงานของถังตกตะกอนในระบบผลิตประปามีหลักการโดยสรุป (Laurent, 1995) ดังนี้ ถังตกตะกอนแบบ pulsator clarifier แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ภายในติดตั้งช่องรับตะกอนส่วนเกิน ท่อระบายน้ำดิบทางด้านล่างและท่อรับน้ำใสด้านบน โดยถังตกตะกอนแบบมีชั้นตะกอน (sludge blanket) ต้องรักษาให้มีชั้นตะกอนคงอยู่ตลอดเวลาเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อจ่ายสารเคมีลงน้ำดิบเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แล้วจะไหลเข้าบริเวณตอนกลางถึงซึ่งเป็นบริเวณที่สร้างสูญญากาศเพื่อสร้างระดับน้ำขึ้น-ลงแล้วไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทางด้านล่างด้วยแรงดัน จะเกิดกระบวนการกวนเร็ว (flash mixing) น้ำจะไหลผ่านช่องเปิดของท่อระบายน้ำดิบเริ่มเกิดกระบวนการกวนช้า (slow mixing) ขึ้นในบริเวณนี้ผ่านชั้นตะกอนเก่าขึ้นไปด้านบน โดยส่วนที่เป็นน้ำใสจะไหลขึ้นด้านบนและเข้าสู่ท่อรับน้ำ ส่วนอนุภาคสารแขวนลอยในน้ำที่ได้ทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้วจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และตกลงสู่ส่วนที่เป็นชั้นตะกอนของถัง เพื่อทำการระบายทิ้งต่อไป

จากหลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดนี้คือ เมื่อน้ำดิบผสมกับสารเคมีในท่อน้ำดิบก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอน น้ำดิบจะไหลเข้าสู่ถังสุญญากาศ เพื่อสร้างระดับน้ำขึ้น-ลงแล้วไหลเข้าสู่บริเวณตกตะกอนทางด้านล่างถัง โดยไหลออกจากท่อที่วางตามแนวนพื้นด้านล่างและเจาะเป็นรูเล็กๆ ทำหน้าที่กระจายน้ำให้ไหลขึ้นไปทั่วพื้นที่ของถัง น้ำใหม่ที่ไหลเข้ามาซึ่งมีการจับรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์กับสารเคมีกลายเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค เมื่อไหลผ่านชั้นตะกอนซึ่งมีการเลี้ยงชั้นตะกอนไว้ในส่วนล่างของถังมีลักษณะเป็นชั้นตะกอนเข้มข้นจะเกิดการชนสัมผัสกันของตะกอนใหม่กับตะกอนเดิม มีผลทำให้เกิดการเร่งให้มีการรวมตัวกันของตะกอนเพื่อให้ตะกอนตกลงด้านล่าง และมีแรงเกาะกันกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้แล้วชั้นตะกอนยังทำหน้าที่เป็นตัวกรองชั้นต้น โดยจะดักจับตะกอนที่เข้ามาใหม่ไว้ไม่ให้ผ่านขึ้นไปได้และยังช่วยลดความเร็วของน้ำตะกอนขึ้นด้านบนอีกด้วย (ทิศทางการไหลตรงกันข้าม) จากกระบวนการทั้งหมดดังกล่าวทำให้กระบวนการเกิดน้ำใสสามารถทำได้เร็วขึ้นและทำให้อนุภาคชนสัมผัสกันได้มากขึ้นมีการเกาะรวมตัวกลายเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้มากขึ้นถึงแม้ว่าในน้ำดิบจะมีอนุภาคแขวนลอยในปริมาณน้อยทำให้สามารถรับอัตราน้ำไหลสูงกว่าถังตกตะกอนโดยทั่วไป



1 - Raw water inlet.  
2 - Clarified water outlet.  
3 - Sludge removal.  
4 - Stilling baffles.  
5 - Upper level of sludge blanket.  
6 - Vacuum chamber.  
7 - Vacuum pump.  
8 - Air release valve.  
9 - Raw water distribution system.  
10 - Sludge concentrators.  
11 - Reagent feed.

Figure 332. Pulsator clarifier.

### รูปที่ 1. โครงสร้างถังตกตะกอน (pulsator clarifier) (Laurent, 1995)

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Montgomery, 2009) ในการออกแบบค่าที่เหมาะสมในการควบคุมความเข้มข้นตะกอน การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลคือ การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (level) ของปัจจัย (factor) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ซ้ำ (replicate) จะ



รูปที่ 2. ถังตกตะกอนแบบควบคุมชั้นตะกอน (superpulsator) (Degremont Technologies, 2018)

ประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด  $ab$  การทดลอง สำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสมบูรณ์ (full factorial design) และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ซึ่งกันและกัน ซึ่งมีรูปแบบทั่วไป คือ  $A*B*C...$  แฟกทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ เช่น การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัย 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด  $k$  ปัจจัย ส่วนการออกแบบการทดลองแบบ  $3^k$  แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัย 3 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด  $k$  ปัจจัย เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล พบว่ามีการนำการออกแบบการทดลองดังกล่าว ไปใช้ในงานวิจัยจำนวนมาก ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการลดของเสียในกระบวนการ เช่น Suwanmanee (2006) ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการพ่นสีที่ทำให้เกิดของเสียสีเป็นผิวน้อยที่สุดในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้ Tuamsee & Kengpol (2008) ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^k$  เพื่อลดปริมาณงานเสียจากกระบวนการผลิตพลาสติกพีวีซีแผ่น Koonmee et al. (2014) ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  ในการวิเคราะห์ส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบถังตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าในงานของ Chomsuwan & Ratana-arporn (2009) มีการศึกษาถึงแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนแบบมีชั้นตะกอน ในกระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยวิธีทางสถิติ ซึ่งในส่วนแรกทำการศึกษหาปริมาณการใช้สารส้มในขั้นตอนการทำให้ น้ำดิบตกตะกอน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น โดยทำการค้นหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดความขุ่นด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางทฤษฎี ในงานของ Chooprajong (2012) ได้ศึกษาการนำตะกอนสดจากถังตกตะกอนแบบ solids contact clarifier และตะกอนแห้งจากบ่อตกตะกอน (lagoon) ในกระบวนการผลิตน้ำประปาล้อมกลับมาใช้ประโยชน์เป็นสารช่วยจับตะกอน (coagulant aid) โดยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งน้ำดิบมีค่าความขุ่นต่ำ Nopparat (2012) ศึกษาวิธีการลดน้ำสูญเสียของโรงงานผลิตน้ำสามเสน 4 ของการประปานครหลวง โดย

การเปลี่ยนระบบการทำงานจากการใช้พนักงานเป็นคนสังเกตดูความขุ่นของน้ำแล้วทำการตั้งเวลาสำหรับระบายตะกอนเพื่อปรับค่าความขุ่นให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มาเป็นระบบการระบายตะกอนแบบอัตโนมัติ ด้วยการติดตั้งหัวเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความขุ่นของบ่อตกตะกอนแล้วส่งผลไปยังอุปกรณ์ควบคุมการปิดเปิดประตูน้ำเพื่อสั่งให้ประตูน้ำเปิดจนกว่าค่าของความขุ่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การที่ระบบอัตโนมัติจะสามารถลดน้ำสูญเสียได้ดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหัววัดความขุ่น จึงทำการทดลองเพื่อเลือกหาตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดความขุ่นที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสูญเสียของระบบระบายตะกอนมีค่าน้อยที่สุด

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีความมั่นใจถึงความเป็นไปได้ในการนำวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลมาใช้กับกรณีศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการควบคุมความเข้มข้นของตะกอนในถังตกตะกอนแบบควบคุมชั้นตะกอน เพื่อให้สามารถลดน้ำสูญเสียและลดปัญหาการอุดตันของระบบระบายตะกอนได้

## วิธีการทดลอง

### 1. สภาพปัญหาและการวิเคราะห์เบื้องต้น

ในการผลิตน้ำประปา ตัวแปรนำเข้าที่สำคัญคือน้ำดิบ สิ่งที่ต้องพิจารณาลำดับแรก คือ ค่าความขุ่นของน้ำดิบในคลองประปา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำกรณีศึกษา จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2 เห็นได้ว่าค่าความขุ่นของน้ำดิบในรอบปี สามารถจำแนกได้เป็น 3 ช่วง ค่าความขุ่นดังกล่าวมีหน่วยเป็น NTU (nephelometric turbidity unit)

ตารางที่ 2. ค่าความขุ่นโดยเฉลี่ยของน้ำดิบโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเวลา 12 เดือน (พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2560)

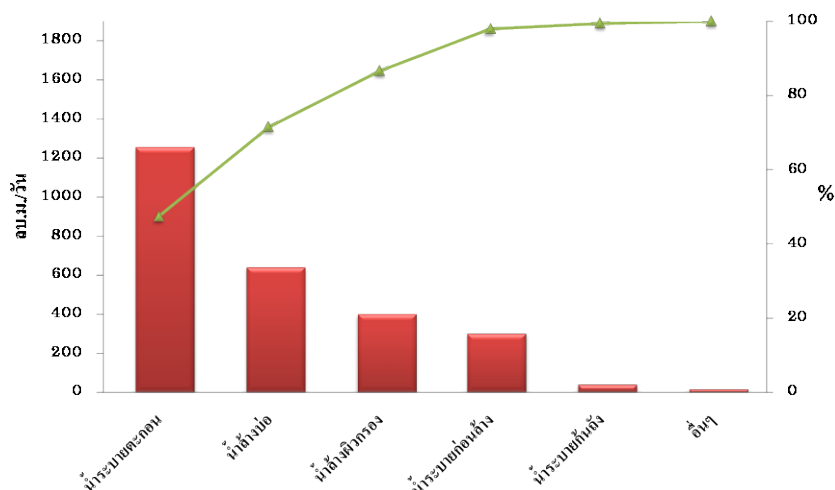
| ช่วงที่ | เดือน                 | ช่วงค่าความขุ่นของน้ำดิบ (NTU) |
|---------|-----------------------|--------------------------------|
| 1       | พฤศจิกายน ถึง พฤษภาคม | 20-30 NTU                      |
| 2       | มิถุนายน ถึง กรกฎาคม  | 30-40 NTU                      |
| 3       | สิงหาคม ถึง ตุลาคม    | 40-50 NTU                      |

From: Samsen water treatment plant, Metropolitan Waterworks Authority (personal contact)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในช่วงเวลาที่มีค่าความขุ่นในน้ำดิบตามฤดูกาล ประมาณ 40-50 NTU นั่นคือประมาณช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคมของทุกปี ซึ่งอยู่ในฤดูฝนของประเทศไทยที่มีจำนวนน้ำดิบมากและเพียงพอต่อการเดินระบบ รวมทั้งน้ำดิบมีความขุ่นสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาระบบน้ำระบายตะกอนในช่วงเวลานี้ นอกเหนือจากคุณสมบัติค่าความขุ่นที่เป็นไปตามสภาพของน้ำดิบในแต่ละช่วงเวลาแล้ว คุณสมบัติอื่นๆ

ของน้ำดิบที่จะใช้ในการทดลอง เป็นไปตามมาตรฐานการควบคุมตามโครงการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบ real time (Metropolitan Waterworks Authority, 2018b)

หลังจากได้เก็บข้อมูลจุดที่น้ำดิบสูญเสียในช่วงดังกล่าว แล้วนำมาสร้างเป็นแผนภาพพายโรต ดังรูปที่ 3 พบว่าน้ำดิบมีการสูญเสียไปในหลายกระบวนการ โดยจุดน้ำระบายตะกอนเป็นจุดที่น้ำสูญเสียมากที่สุด

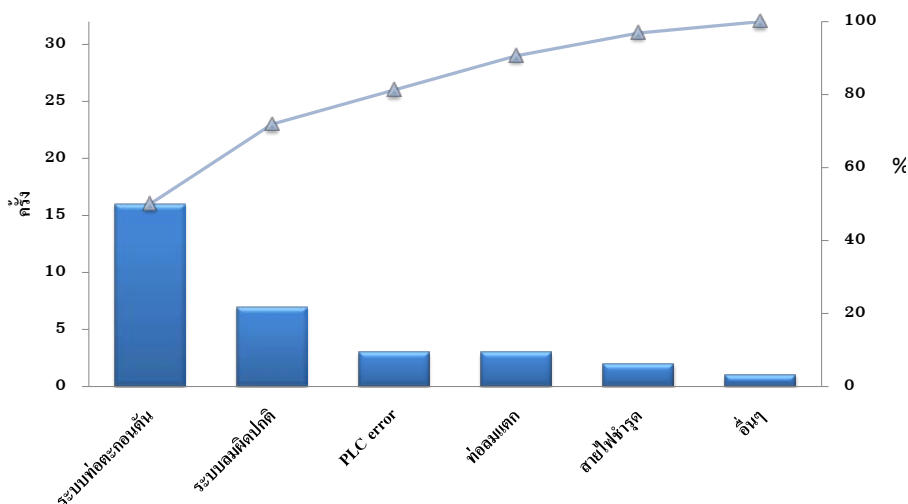


รูปที่ 3. แผนภาพพายโรตแสดงตำแหน่งและปริมาณน้ำสูญเสียต่อวัน โดยเฉลี่ยช่วงสิงหาคมถึงตุลาคม 2560

From: Samsen water treatment plant, Metropolitan Waterworks Authority (personal contact)

แต่อย่างไรก็ตาม การลดน้ำระบายตะกอนจะมีผลให้ความเข้มข้นของตะกอนสูงขึ้น ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของตะกอนให้เหมาะสมด้วย อธิบายได้ดังรูปที่ 4 ถึงปัญหาทางแรงจูงใจของระบบตกตะกอน ปัญหาที่มีจำนวนครั้งสูงสุดคือ ระบบที่ระบายตะกอนตัน สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการที่ตะกอนมีความเข้มข้นสูงเกินไปและเกิดการอุดตันตามท่อหรือวาล์ว ผู้วิจัยจึงได้กำหนดตัวแปรผลตอบ (response variable) เป็นการควบคุมความเข้มข้นของตะกอนที่เหมาะสมไว้ที่ 70-80 % ตามมาตรฐานของการควบคุมระบบ (Laurent, 1995)

เบื้องต้นผู้วิจัยได้ใช้หลักการ why-why analysis เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการที่ทำให้ความเข้มข้นของตะกอนต่ำเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดน้ำสูญเสีย และสูงเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาระบบตะกอนอุดตัน โดยการจัดประชุมระดมความคิดจากผู้มีประสบการณ์และเจ้าหน้าที่ประจำโรงงาน ตรวจสอบเหตุการณ์ปัญหาที่เกิดขึ้น ณ หน่วยงานจริงเพื่อยืนยันแนวคิดของทีมงาน ทำการวิเคราะห์บนพื้นฐานของความเป็นไปได้ โดยจากการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาหลักมาจาก 2 สาเหตุหลักคือ อัตราการจ่ายสารส้มไม่เหมาะสม (สอดคล้องกับที่แสดงใน Chooprajong (2012) และอัตราการกระแทกน้ำไม่เหมาะสม



รูปที่ 4. แผนภาพพาร์โตแสดงปัญหางานแจ้งซ่อมระบบตกตะกอนช่วงสิงหาคมถึงตุลาคม 2560

From: Samsen water treatment plant, Metropolitan Waterworks Authority (personal contact)

## 2. การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในช่วงเดือนสิงหาคมถึงตุลาคม คำน้ำดิบในช่วงนี้ของทุกปีมีค่าความขุ่นโดยประมาณ 40 ถึง 50 NTU ดังนั้นค่าที่ได้จากการสรุปผลการวิจัยครั้งนี้ จึงใช้ได้ดีสำหรับการเดินระบบที่น้ำดิบมีค่าความขุ่นในช่วงดังกล่าวและรวมถึงน้ำดิบมีค่า pH 5.0 ถึง 9.0 ถึงตกตะกอนที่ใช้ทำการทดลองมีกำลังการผลิต 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหน่วย มีจำนวน 1 หน่วย มีเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง 6.5 เมตร และมีความสูง 4.75 เมตร การควบคุมคุณภาพน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนดังกล่าว จะต้องได้ดังนี้ ค่าความขุ่น (turbidity)  $7 \pm 3$  NTU ค่า pH 6.5 ถึง 8.5 และค่าความเป็นด่าง (alkalinity) มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (as  $\text{CaCO}_3$ )

สารส้มที่ใช้ในการทดลองเป็นสารส้มน้ำ 50% (W/W) โดยมีความเข้มข้นที่อัตราการจ่ายประมาณ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.2 อัตราการไหลของน้ำดิบประมาณ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปัจจัย (factor) ที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นของตะกอน จำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการจ่ายสารส้ม และอัตราการกระแทกน้ำ โดยได้กำหนดค่าของปัจจัยไว้ 3 ระดับ (level) ซึ่งได้ข้อมูลอ้างอิงมาจากระบวนการควบคุมที่ใช้อยู่ของกรณีศึกษา เป็นตัวแปรอิสระในการทดลอง ดังนี้

- ปัจจัยอัตราการจ่ายสารส้ม (Factor A) มี 3 ระดับ คือ 60, 100 และ 140 ลิตรต่อชั่วโมง
- ปัจจัยอัตราการกระแทกน้ำ (Factor B) มี 3 ระดับ คือ 30, 60 และ 90 ครั้งต่อชั่วโมง

ตัวแปรตามสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ตัวแปรตอบสนอง (response variable) ในการทดลอง ได้แก่ค่าความเข้มข้นของตะกอนที่เปลี่ยนไปในแต่ละการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบ full factorial design เพื่อศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบไม่สุ่ม เนื่องจากต้องเก็บตัวอย่างเป็นรอบๆ ของการปรับอัตราการจ่ายสารส้ม เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากความเข้มข้นของสารส้มที่สูงยังค้างอยู่ในระบบ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลการทดลองและเป็นการลดความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 2 (type II error:  $\beta$ ) โดยรวมแล้วผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งสิ้น  $3 \times 3 \times 3$  รวมเป็น 27 หน่วยการทดลอง

### 3. วิธีดำเนินการทดลอง

ดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการทดลอง (อ้างอิงการทดสอบตาม Laurent, 1995) ดังนี้ เริ่มต้นด้วยการวัดค่าความขุ่นของน้ำดิบที่ถึงพักด้วยเครื่อง turbidity meter หลังจากนั้น ทำการปรับอัตราการจ่ายสารส้ม และปรับอัตราการกระแทกน้ำตามปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง การปรับอัตราการจ่ายสารส้ม ใช้วิธีปรับที่เครื่องจ่ายเป็น stroke และการปรับอัตราการกระแทกน้ำ ใช้วิธีปรับที่ timer ให้สอดคล้องกับค่าระดับของปัจจัยที่ต้องการ หลังจากการปรับค่าของระบบแต่ละการทดลอง จะปล่อยให้ระบบทำงานประมาณ 40 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าสารเคมีได้ทำปฏิกิริยากับน้ำดิบโดยสมบูรณ์แล้ว หลังจากนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำระบายนตะกอนที่ท่สำหรับเก็บตัวอย่าง และนำตัวอย่างน้ำระบายนตะกอนที่ได้มาเทใส่กระบอกตวงให้ได้ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อให้ตะกอนในน้ำเกิดการแยกตัวระหว่างน้ำสะอาดกับตะกอน (ดังรูปที่ 5) ทำการอ่านค่าของตะกอนที่ได้แล้วนำไปบันทึกผล โดยการอ่านค่าจะอ่านจากจุดสูงสุดที่ตะกอนแยกตัวกับน้ำสะอาด ทำการปรับค่าปัจจัยและระดับของปัจจัยและทำการทดลองซ้ำจนครบ 27 หน่วยการทดลอง



รูปที่ 5. การแยกตัวของน้ำและตะกอนจากการเก็บตัวอย่างน้ำระบายนตะกอน 1,000 มิลลิลิตร

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองจำนวน 27 หน่วยการทดลอง แสดงผลดังตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่าของความเข้มข้นตะกอนที่ได้จากการทดลองมีค่าตั้งแต่ 40% (V/V) ถึง 92% (V/V) โดยค่าควบคุมในระบบตามมาตรฐานการควบคุม (Laurent, 1995) จะใช้ค่าอ้างอิงที่ 70% (V/V) ถึง 80% (V/V) พบว่าจากผลการทดลองมีเพียง 8 ค่าใน 27 ค่าที่อยู่ในค่าควบคุมดังกล่าว ในขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะต้องนำผลการทดลองทั้งหมดนี้มาดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลและออกแบบค่าควบคุม ตามแนวทางในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Montgomery, 2009)

### 1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ในขั้นตอนนี้จะนำผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 3 มาทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab release 16 (Minitab Inc., 2015) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลโดยดูจากรูปแบบของส่วนตกค้าง (residuals) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีค่าคงที่ ดังที่ได้ดำเนินการใน Tuamsee & Kengpol (2008) และ Koonmee et al. (2014) จึงจะสามารถเชื่อถือได้ว่าผลการทดลองมีความถูกต้อง

ตารางที่ 3. รูปแบบการทดลองและผลการทดลอง

| A<br>(L/hr) | B<br>(times/hr) | ตะกอนในน้ำระบายตะกอน (%) |            |            |
|-------------|-----------------|--------------------------|------------|------------|
|             |                 | ครั้งที่ 1               | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| 60          | 30              | 44                       | 46         | 40         |
| 60          | 60              | 63                       | 65         | 60         |
| 60          | 90              | 78                       | 74         | 72         |
| 100         | 30              | 45                       | 42         | 47         |
| 100         | 60              | 72                       | 75         | 68         |
| 100         | 90              | 89                       | 90         | 92         |
| 140         | 30              | 45                       | 49         | 47         |
| 140         | 60              | 72                       | 65         | 65         |
| 140         | 90              | 81                       | 78         | 72         |

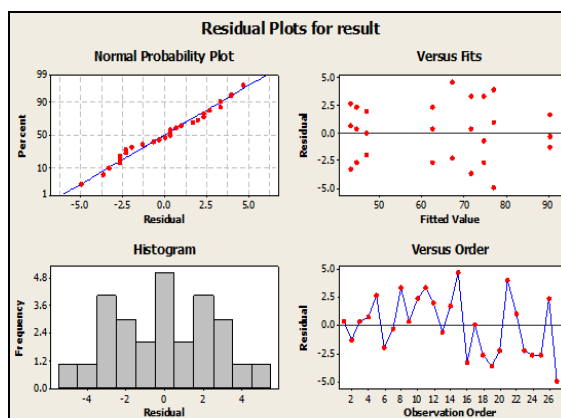
หมายเหตุ: ปัจจัย A คือ อัตราการจ่ายสารส้ม (ลิตรต่อชั่วโมง)

ปัจจัย B คือ อัตราการกระแทกน้ำ (ครั้งต่อชั่วโมง)

จากรูปที่ 6 ลักษณะจุดของค่าส่วนตกค้าง (residuals) บนกราฟมีการกระจายตามแนวเส้นตรงเป็นปกติ และฮิสโตแกรม (histogram) มีความสมมาตร ทำให้สรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ เมื่อพิจารณา

กราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะแบบสุ่ม จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบอิสระไม่ขึ้นกับค่าประมาณบนเส้นถดถอยและการกระจายตัวทั้ง ด้านบวกและด้านลบใกล้เคียงกัน ช่วงกว้างของข้อมูลค่อนข้างคงที่ และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วน ตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน เมื่อพิจารณากราฟ ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง พบว่ากราฟมีลักษณะที่ไม่สามารถคาดเดาทิศทางหรือแนวโน้มได้ จึง สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความอิสระต่อกัน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูล ดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้



รูปที่ 6. Residual plots ของผลการทดลอง

## 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จะทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันสมมติฐานว่าปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม มีผลต่อค่าความเข้มข้นของตะกอนอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามแนวทางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Tuammee & Kengpol, 2008; Koonmee et al., 2014)

จากรูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  มีค่า เท่ากับ 97.35% ถือว่าเป็นค่าที่สูงแสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมต่อการสร้างสมการถดถอยได้ และค่า  $R^2$  มีค่า ใกล้เคียงกับ  $R^2(\text{adj})$  แสดงว่าข้อมูลที่น่ามาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์มีค่าเพียงพอ เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักคือ อัตราการจ่ายสารส้ม (A) และอัตราการกระแทกน้ำ (B) สามารถสรุปได้ว่ามีอิทธิพลต่อค่าความเข้มข้นของตะกอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $p < 0.05$ ) และปัจจัยร่วมคือ อัตราการจ่ายสารส้มร่วมกับอัตราการกระแทกน้ำ ( $A*B$ )

ก็มีอิทธิพลต่อค่าความเข้มข้นของตะกอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $p < 0.05$ )

| Analysis of Variance for result, Using Adjusted SS for Tests |    |         |         |         |        |       |
|--------------------------------------------------------------|----|---------|---------|---------|--------|-------|
| Source                                                       | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F      | P     |
| Alum (A)                                                     | 2  | 341.63  | 341.63  | 170.81  | 17.60  | 0.000 |
| Pul (B)                                                      | 2  | 5840.07 | 5840.07 | 2920.04 | 300.92 | 0.000 |
| Alum*Pul (A*B)                                               | 4  | 229.26  | 229.26  | 57.31   | 5.91   | 0.003 |
| Error                                                        | 18 | 174.67  | 174.67  | 9.7     |        |       |
| Total                                                        | 26 | 6585.63 |         |         |        |       |
| S = 3.11508 R-Sq. = 97.35% R-Sq.(adj) = 96.17%               |    |         |         |         |        |       |

รูปที่ 7. ภาพแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

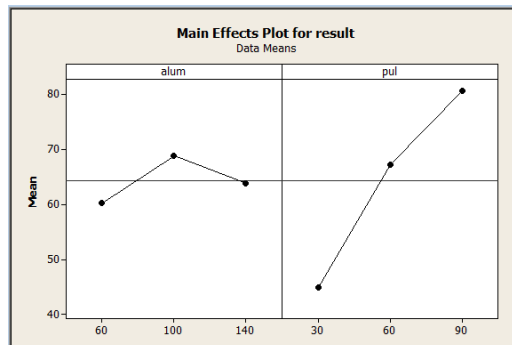
### 3. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

เมื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักจาก 2 ปัจจัย ดังรูปที่ 8 พบว่า อัตราการจ่ายสารส้มมีผลความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอน [สอดคล้องกับการทดลองของ Chooprajong (2012)] ยิ่งปรับอัตราการจ่ายสารส้มมากก็ จะทำให้ความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราการจ่ายเกิน 100 ลิตร/ชม. จะทำให้ ความเข้มข้นของ น้ำระบายตะกอนลดลง ในขณะที่อัตราการกระแทกน้ำ ยิ่งปรับให้อัตราการกระแทกน้ำสูง จะทำให้ความเข้มข้นของ น้ำระบายตะกอนสูงขึ้นด้วย

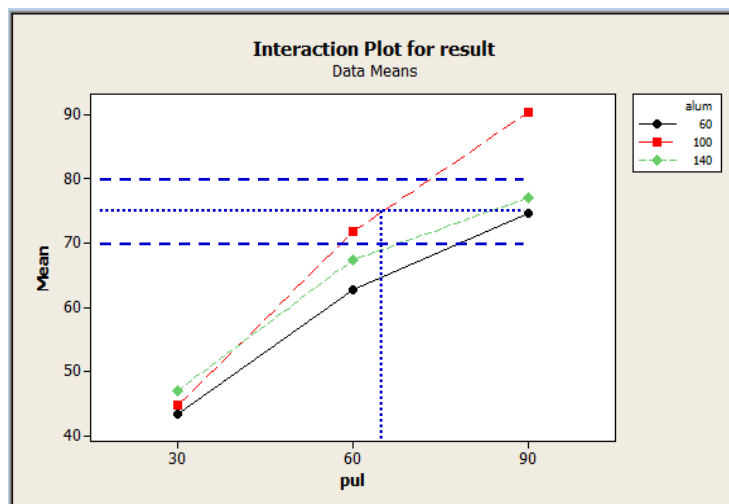
เมื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยร่วมต่อความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอน พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอัตรา การจ่ายสารส้มและอัตราการกระแทกน้ำมีผลต่อความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตการ เปรียบเทียบของกราฟที่มีค่าความชัน ไม่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น อัตราการกระแทกน้ำ 30 ครั้ง/ชม.และอัตราการจ่าย สารส้ม 140 ลิตร/ชม. มีผลต่อความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอนมากกว่าอัตราการกระแทกน้ำ 30 ครั้ง/ชม.และอัตรา การจ่ายสารส้ม 100 ลิตร/ชม. แต่อัตราการกระแทกน้ำ 60 ครั้ง/ชม.และอัตราการจ่ายสารส้ม 140 ลิตร/ชม.ผลต่อ ความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอนน้อยกว่าอัตราการกระแทกน้ำ 60 ครั้ง/ชม. และอัตราการจ่ายสารส้ม 100 ลิตร/ชม. เป็นต้น เมื่อพิจารณากราฟอิทธิพลจากปัจจัยหลัก และกราฟอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัยหลัก จะสามารถนำไปใช้ เป็นแนวทางในการปรับอัตราการจ่ายสารส้มกับอัตราการกระแทกน้ำที่เหมาะสมต่อไป

ความต้องการควบคุมความเข้มข้นของตะกอนที่ค่า 70-80% สามารถปรับกระบวนการโดยดูค่าระดับของ ปัจจัยที่เหมาะสมได้จากกราฟแสดงอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยหลัก จากรูปที่ 9 ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์โดยทำการ ลากเส้นจากแกน Y เพื่อหาจุดตัดจะได้ว่า เส้นอัตราการจ่ายสารส้ม (alum) 100 มีความชันที่ตัดกับค่าความเข้มข้น ของตะกอนทั้ง 70% , 75% และ 80% เมื่อลากเส้นจากจุดตัดที่ 75% ลงมาตัดแกน X จะได้ค่าอัตราการกระแทกน้ำ

(pul) 65 จึงเลือกค่า alum 100 และ ค่า pul 65 สำหรับนำไปใช้เป็นค่าปรับอัตราการจ่ายสารส้มและอัตราการกระแทกน้ำตามลำดับ แล้วเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบความสามารถของกระบวนการต่อไป



รูปที่ 8. กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักต่อความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอน



รูปที่ 9. แสดงอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยหลักต่อความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอน

#### 4. การตรวจสอบความสามารถของกระบวนการเพื่อยืนยันผลการวิจัย

การทดสอบยืนยันผลการวิจัย เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 2 ปัจจัย จากที่ได้กำหนดไว้ นั่นคือ จะทำการปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 2 ปัจจัย ตามค่าที่ได้กำหนดไว้คือ ค่าอัตราการจ่ายสารส้ม 100 ลิตรต่อชม. และค่าอัตราการกระแทกน้ำ 65 ครั้งต่อชม. และได้เก็บตัวอย่างผลของน้ำระบายตะกอน

มา 30 ตัวอย่าง ดังแสดงผลในตารางที่ 4 [ตามแนวทางการยืนยันผลที่สอดคล้องกับ Tuammee & Kengpol (2008)] และเมื่อนำมาวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab release 16 (Minitab Inc., 2015) ผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่า  $C_p = 1.21$ ,  $C_{pk} = 1.08$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 ทั้งคู่ จึงสรุปได้ว่ากระบวนการมีความสามารถที่จะดำเนินการซ้ำๆ ต่อไป ได้โดยผลจากกระบวนการจะอยู่ในค่าควบคุม ดังรูปที่ 10 แสดงความสามารถของกระบวนการควบคุมความเข้มข้น น้ำระบายตะกอน

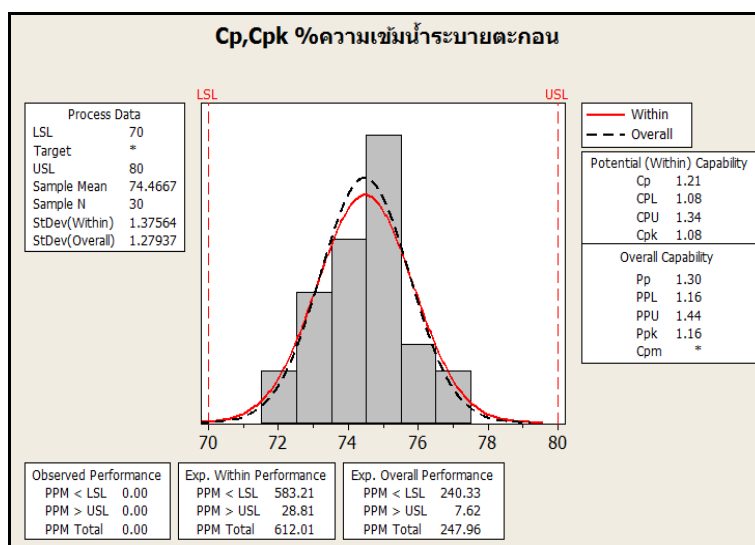
ตารางที่ 4. ผลการเก็บค่า %น้ำระบายตะกอนจำนวน 30 ตัวอย่าง

| ครั้งที่       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| %น้ำระบายตะกอน | 76 | 75 | 74 | 76 | 75 | 74 | 75 | 77 | 73 | 76 |
| ครั้งที่       | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| %น้ำระบายตะกอน | 75 | 74 | 73 | 73 | 74 | 72 | 75 | 73 | 75 | 75 |
| ครั้งที่       | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| %น้ำระบายตะกอน | 74 | 74 | 77 | 73 | 75 | 75 | 75 | 74 | 72 | 75 |

#### สรุปผลการทดลอง

จากการเดินระบบในรูปแบบเดิม พนักงานผู้ควบคุมระบบมีการปรับตั้งค่าต่างๆ ไว้คงที่และเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นมากขึ้น (หรือน้อยลง) ส่งผลให้ตะกอนมีความเข้มข้นสูง (หรือต่ำ) เกินไป ก็จะปรับอัตราการจ่ายสารส้ม และหรือปรับอัตราการกระแทกน้ำให้มีค่าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) จนกว่าจะได้ความเข้มข้นของตะกอนอยู่ในช่วงประมาณ 70% ถึง 80% โดยใช้ประสบการณ์ส่วนบุคคล นอกจากนี้หากใช้เวลาปรับระบบนานเกินไปอาจเกิดปัญหาอุดตันจนระบบผลิตหยุดทำงาน การเกิดน้ำสูญเสียมากขึ้นเรื่อยๆ อาจส่งผลถึงปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้ในบางช่วงเวลาได้ปริมาณลดลง เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบเดิมกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของตะกอนคือ อัตราการจ่ายสารส้ม อัตราการกระแทกน้ำและปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการจ่ายสารส้มร่วมกับอัตราการกระแทกน้ำ สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการควบคุมกระบวนการได้คือ ใช้อัตราการจ่ายสารส้ม 100 ลิตร/ชั่วโมง และอัตราการกระแทกน้ำ 65 ครั้ง/ชั่วโมง เมื่อนำค่าควบคุมดังกล่าวไปทดลองใช้ในกระบวนการจริงของโรงงานผลิตน้ำกรณศึกษา และเก็บข้อมูลการดำเนินงานเป็นเวลาหนึ่งไตรมาส จากช่วงค่าความขุ่นของน้ำดิบที่เท่ากันคือ 40-50 NTU พบว่าสามารถลดน้ำสูญเสียลงได้ 38% หรือคิดเป็น 4,100 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน คิดเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ 8,300 บาทต่อเดือน และสามารถลดปัญหาทางซ่อมที่เกี่ยวข้องกับระบบท่อตะกอนอุดตันได้ 100% คือจากเดิมมีการแจ้งซ่อมจากปัญหาดังกล่าวเฉลี่ย 2.7 ครั้งต่อเดือน ภายหลังการกำหนดค่า

ควบคุมปัจจัย พบว่าไม่มีการแจ้งซ่อมอันเนื่องมาจากปัญหาระบบท่อตะกอนอุดตัน



รูปที่ 10. แสดงความสามารถของกระบวนการควบคุมความเข้มข้นน้ำระบายตะกอน

จากการศึกษาเปรียบเทียบกับงานของ Chomsuwan & Ratana-arporn (2009) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบในระบบ 3 เฟสที่ประกอบด้วยถังตกตะกอนแบบมีชั้นตะกอน 4 หน่วยและถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนชั้นตะกอน 2 หน่วย พบความแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่เน้นการศึกษาการควบคุมการผลิตในระบบย่อยที่มีถังตกตะกอนแบบมีชั้นตะกอนจำนวน 1 หน่วยในเฟสที่ 1 เท่านั้น นอกจากนี้ ในงานดังกล่าวมีการสรุปผลการศึกษาค่าประมาณทางสถิติของปริมาณสารส้มที่ใช้กับแต่ละช่วงค่าความขุ่นของน้ำดิบตั้งแต่ 10-100 NTU แต่พบว่ารูปแบบของสารส้มที่เดิมเข้าสู่ระบบเป็นคนละแบบกับงานวิจัยนี้ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะช่วงค่าความขุ่นของน้ำดิบ ที่ 40-50 NTU ซึ่งถือเป็นค่าความขุ่นที่สูงและการควบคุมระบบทำได้ค่อนข้างยาก การกำหนดค่าของปัจจัยเพื่อควบคุมค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของน้ำระบายตะกอน ในที่นี้คืออัตราการใช้สารส้มที่ 100 ลิตร/ชม. และอัตราการกระแทกน้ำที่ 65 ครั้ง/ชม. นั้น การที่จะทำให้ระบบหรือกระบวนการดำเนินไปอย่างปกติได้ ผู้ควบคุมกระบวนการจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อความเข้มข้นน้ำระบายตะกอนให้อยู่ในสภาวะคงที่ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ เช่น ช่วงของค่าความขุ่นน้ำดิบ ค่า pH ของน้ำดิบ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมในสภาวะความขุ่นน้ำดิบที่แตกต่างไปตามฤดูกาลและแหล่งน้ำต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ส่วนควบคุมการผลิตน้ำ 4 กองผลิตและจ่ายน้ำ ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- Chomsuwan, C. & Ratana-arporn, L. (2009). *Improvement turbidity removal efficiency of clarifier in water treatment process of water treatment plant*. pp. 650-658. In the 47th Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering, 17-20 March 2009, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Chooprajong, T. (2012). *Recycle of sludge from water supply treatment system for using as coagulant aid and reducing of alum dose* (Master thesis) Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Degremont Technologies. (2018). *Separation technology: superpulsator*. Retrieved September 19, 2018, from <http://www.degremont-technologies.com/SUPERPULSATOR-R>
- Koonmee, P., Songserm, W. & Wuttiornpun, C. (2014). The use of granular blast furnace slag in concrete manufacturing: statistical analysis. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 24(1), 103-110. (in Thai)
- Laurent, S. (1995). *Manual of Samsan1 Water Treatment Plant*. Contract No.G-SS-1A, Bangkok, Thailand: Itathai Industrial Degremont Aquathai.
- Minitab Inc. (2015). *Minitab 16 Statistical Software*. Bangkok, Thailand: Solution Center Co., Ltd. (in Thai)
- Montgomery, D. C. (2009). *Design and Analysis of Experiments* (7th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Metropolitan Waterworks Authority. (2018a). *Performance statistics and operation highlights of Metropolitan Waterworks Authority*. Retrieved September 19, 2018, from [https://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa\\_internet\\_eng/ewt\\_news.php?nid=97](https://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa_internet_eng/ewt_news.php?nid=97)
- Metropolitan Waterworks Authority. (2018b). *Real time water quality of Metropolitan Waterworks Authority*. Retrieved September 19, 2018, from <http://twqonline.mwa.co.th/EN/map.php?type=>
- Nopparat, P. (2012). *Improvement of side-drain equipment for water loss reduction case study of Samsen 4 water plant* (Master thesis) Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)

- Suwanmanee, P. (2006). *The study of suitable factors in painting process by design of experiment case study: The furniture industry* (Master thesis) Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)
- Tuamdee, S. & Kengpol, A. (2008). Defect reduction in plastic sheet process: Applying the design of experiments; A company case study in plastic industry. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 18(3), 80-89. (in Thai)
- Udomsinrot, K. (1993). *Wastewater Engineering*. Bangkok: Mittr Nara Karnpim Limited Partnership. (in Thai)