บทที่ 2

การสำรวจเอกสาร และ แนวสมมุติฐาน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 แอลจี

นิยามของแอลจีที่ง่ายที่สุด ก็คือ แอลจีเป็นพืชขนาดเล็ก ซึ่งสามารถสังเคราะห์แสงได้อันเป็นลักษณะสมบัติที่ทำให้แอลจีแตกต่างจากฟังไจ และ บักเตรี การปล่อยก๊าซออกซิเจน จากขบวนการสังเคราะห์แสง การปล่อยสารที่ทำให้เกิดรสและกลิ่นรวมทั้งการทำให้เครื่องกรองอุดตันทำให้แอลจีมีความสำคัญในวงการของวิศวกรรมสุขาภิบาล.

แอลจีมีตั้งแต่เซลล์เดี่ยว จนถึงกลุ่มใหญ่รวมตัวเป็นเส้นใย จัดเป็นพืชน้ำ แต่ก็อาจมีชีวิตอยู่ได้นานในสภาพแห้งๆ จึงอาจพบได้ในดิน, ต้นไม้, ก้อนหิน, ที่มีภูมิอากาศชื้นๆ หรือใกล้ทะเล โดยทั่วไปอาศัยอยู่มากในแหล่งน้ำทั่วไปที่มีแสงแดดส่องถึง

แอลจี แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ตามสีของแอลจีได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. แอลจีสีเขียว(green algae) มีคลอโรฟิลล์ มักอาศัยอยู่ในน้ำจืดมีทั้งเซลล์เดียว, เส้นใย และเป็นกลุ่ม(colony)

2. แอลจีสีน้ำตาล(brown algae)มักพบในน้ำเค็ม และบางชนิดพบมากในผิวหน้าของมหาสมุทร แต่ไดอะตอม(diatoms) ซึ่งจัดเป็นแอลจีสีน้ำตาล สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืด และ น้ำเค็ม น้ำผิวดิน และในดิน

3. แอลจีสีแดง (red algae) ส่วนใหญ่เป็นเส้นใย เช่นสาหร่ายทะเล ส่วนแอลจีสีเขียวอมน้ำเงิน(blue-green algae) นั้นปัจจุบันเรียก Cyanobacteria หรือ blue-green bacteria ซึ่งเป็นพวก Procaryotic microorganisms เพราะไม่มีนิวเคลียส

แอลจีใช้แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานในการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ในน้ำให้เป็นสารอินทรีย์ในรูปของโปรโตพลาสซึม(protoplasm) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์, แอมโมเนีย และฟอสเฟต สร้างเซลล์ใหม่ และออกซิเจน ผลผลิตสุดท้ายของขบวนการสังเคราะห์แสง คือ โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{แสงแดด}} CH_2O + O_2 + H_2O(\text{Fogg}) \quad \ldots\ldots\ldots (2.1)$$

ขบวนการเมตาโบลิซึม(metabolism) เริ่มต้นดังสมการทั่วไปข้างต้น หากแต่ คาร์โบไฮเดรต(CH_2O) ไม่ใช่ผลผลิตสุดท้าย สมการที่แสดงถึงการเจริญเติบโตของแอลจีสามารถแสดงได้ดังสมการจาก Chlorella(Fogg) (15) ข้างล่างนี้

$$NH_3 + 5.7\ CO_2 + 12.5H_2O \xrightarrow{\text{แสงแดด}} C_{5.7}H_{9.8}O_{2.3}N + 6.25\ O_2 + 9.1H_2O \quad \ldots\ldots(2.2)$$

ในกรณีไร้แสงแดด แอลจีบางชนิดสามารถสร้างเมตาโบลิซึมสังเคราะห์ทางเคมี (chemosynthetic metabolism) ได้คล้ายกับบักเตรี ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้ แอลจีต้องการออกซิเจนในการออกซิเดชั่น แอลจีอื่นๆย่อยสลายโปรโตพลาสซึมของตัวเองเพื่อสร้างพลังงานในการดำรงชีวิต ซึ่งเรียกว่า endogenous metabolism ดังสมการข้างล่างนี้:

$$C_{5.7}H_{9.8}O_{2.3}N + 6.25\ O_2 \longrightarrow 5.7CO_2 + NH_3 + 3.4H_2O \quad \ldots.(2.3)$$

แอลจีที่อาศัยในน้ำบางชนิดสามารถว่าย หรือคลานได้ แม้ว่าแอลจีส่วนใหญ่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยตัวเองได้ก็ตาม ซึ่งพวกที่เคลื่อนที่ได้นี้มีโครงสร้างที่คล้ายแส้เรียกว่าแฟลกเจลลา (flagella) บางคนจึงจัดพวกนี้ให้เป็นโปรโตซัวมากกว่าจะเป็นแอลจี แต่อย่างไรก็ตาม ในแง่ของทางสุขาภิบาลน่าที่จะจัดให้เป็นแอลจีมากกว่า เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์และสังเคราะห์แสงได้(40)

จุลชีพซึ่งลอยกระจายโดยอิสระ หรือเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในกระแสน้ำ เรียกรวมกันว่า"แพลงตอน" (plankton) ซึ่งรวมถึงแพลงตอนแอลจี(plankton algae)และพืชอื่นๆรวมกันเป็น"แพลงตอนพืช"(phytoplankton หมายถึง plant plankton) นอกจากนั้นยังมี "แพลงตอนสัตว์" (zooplankton) เมื่อแหล่งน้ำเป็นอ่างน้ำหรือทะเลสาปที่ลึกและกว้างใหญ่ โดยทั่วไปจะมีแพลงตอนแอลจีมากกว่าแบบแอลจีเกาะติดหรือ benthic algae

ถ้าไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำ การเจริญเติบโตของแอลจีขึ้นอยู่กับ ปริมาณแร่ธาตุในน้ำ เช่นในน้ำกระด้างจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ จากไบคาร์บอเนต จึงเป็นการลดความกระด้างและเพิ่มค่าพีเอช.

จะอย่างไรก็ตาม Heukelekian (35) ได้สรุปว่า เนื่องจากแอลจีต้องการสารอนินทรีย์ เช่นฟอสเฟต,ไนเตรต,แอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ ในการสังเคราะห์แสง เปลี่ยนไปเป็นอินทรียสาร และออกซิเจน จึงควรจัดแอลจีให้เป็น ' ผู้สร้าง ' อินทรียสาร มากกว่าจะเป็น ' ผู้ทำลาย '

2.2 บทบาทของแอลจีต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.1 ผลทางเคมี

ในระหว่าง ขบวนการสังเคราะห์แสง ขณะมีแสงแดด จะมีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกจากน้ำอยู่ตลอดเวลา และมักจะทำให้ (bound) monocarbonates ซึ่งแทบจะไม่ละลายน้ำเลย ตกตะกอนได้ ผลดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำ ยิ่งถ้ามีแอลจีเติบโตอยู่มากๆ อาจลดความกระด้างของน้ำลงได้ถึงหนึ่งในสาม(40)

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ความกระด้าง ยังผลให้มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าพีเอช(pH) ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อแอลจีมีความตื่นตัวในการสังเคราะห์แสงสูงขึ้น จะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อแอลจีไม่ได้สังเคราะห์แสงในเวลากลางคืน พีเอชก็จะลดลงเพราะแอลจีปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในระหว่างหายใจ(respiration) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างและพีเอช เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในระบบบำบัดน้ำ เนื่องจากจะกระทบถึงปริมาณคลอรีน,สารส้ม และสารเคมีอื่นๆ ที่จะต้องเติมในระบบนั้นๆ

เมื่อแอลจีเจริญเติบโตมากก็มักจะทำให้น้ำมีคุณสมบัติในทางกัดกร่อนสูงขึ้น ส่งผลกระทบกระเทือนถึงระบบส่งจ่ายน้ำ และขบวนการทางอุตสาหกรรมอื่นๆอีกมาก

2.2.2 บทบาทของแอลจีในระบบประปา

เป็นที่ทราบกันอย่างดีว่าแอลจีสามารถทำให้เครื่องกรองทรายอุดตัน,ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องรสและกลิ่น นอกจากนี้ ยังสามารถทำให้พีเอช,ความเป็นด่าง,สี,ความขุ่นของน้ำเปลี่ยนแปลงได้ด้วย ความสำคัญอีกอันหนึ่งของแอลจีก็คือไปเพิ่มปริมาณอินทรียสารในน้ำขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งเป็นปัญหาที่ยุ่งยากต่อระบบบำบัดน้ำทั้งสิ้น

แอลจีบางชนิดแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็อาจก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่นพวกไดอะตอม Tabellaria, Synedra และ Melosira ทำให้ช่วงเวลาการกรองสั้นลง

แอลจีที่เกาะติดกับก้อนหิน,ไม้,ดิน ฯลฯ อาจเจริญเติบโตต่อเนื่องกันเป็นแผ่น เมื่อน้ำไหลแรง ก็อาจชะให้แผ่นแอลจีหลุดร่อนไปกับกระแสน้ำได้ ซึ่งอาจไปก่อให้เกิดปัญหา

อุดตันตะแกรงก่อให้เกิดเป็นแผ่นเมือก (Slime) และเป็นแหล่งของกลิ่นและรสโดยเฉพาะถ้าเกิดย่อยสลายแบบแอนแอโรบิค (anaerobic decomposition) ขึ้น

แอลจีที่สะสม และเติบโตบนผิวของเครื่องกรองทรายช้า ในลักษณะเป็นฟิลม์บาง เมือกๆ จะค่อยๆ ทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่ก็อาจมีประโยชน์ในแง่ที่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำที่ไหลผ่าน ก่อให้เกิดการย่อยสลายอินทรีสารภายในเครื่องกรองโดยบักเตรีอยู่ในสภาวะแอโรบิคได้ (aerobic) เมือกของแอลจีและพืชน้ำ, สัตว์น้ำอื่นๆ ที่อยู่บนผิวของเครื่องกรองทรายช้า เรียกว่า "ผิวกรอง" (filter skin) หรือภายใต้ภาษาเยอรมัน เรียกว่า " Schmutzdecke "

เมื่อแหล่งน้ำดิบเป็นน้ำจากอ่างเก็บน้ำ ปัญหาเรื่องการขจัดแอลจี ถือเป็นปัญหาใหญ่ เพราะถ้าผ่านขบวนการโคแอกกูเลชั่น (coagulation) ที่ไม่ดี จะมีไดอะตอมมากก่อให้เกิดปัญหากับเครื่องกรองเร็ว เกิดการอุดตันในชั้นทรายกรอง และยากต่อการทำความสะอาดเม็ดทรายด้วยระบบล้างย้อนกลับ (backwash) เป็นการสิ้นเปลืองเวลาและปริมาณน้ำในการทำความสะอาด ทำให้ต้องเปลี่ยนชั้นทรายใหม่บ่อยๆ

น้ำดิบที่มีแอลจีมาก จะรบกวนการทำงานของขบวนการโคแอกกูเลชั่น ทำให้การตกตะกอนของฟล็อคในถังตกตะกอนไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร มีรายงานว่า Asterionella และ Synedra เป็นตัวขัดขวางการเกิดฟล็อคที่ดี[40] โดยอาจเป็นไปได้ว่าแอลจีชนิดเหล่านี้อาจก่อให้เกิดปัญหาระหว่างการโคแอกกูเลชั่น และการตกตะกอน ได้มากกว่าชนิดอื่นๆ

ดังกล่าวแล้วว่า แอลจีก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช, ความเป็นด่าง, ความกระด้างทั้งหมด, และค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, D.O.) หรืออาจเพิ่มปริมาณอินทรียสารของน้ำดิบได้ ดังนั้นแอลจีจึงมีผลรบกวนต่อขบวนการบำบัดน้ำทางเคมี เช่น อาจจำเป็นต้องแปรปริมาณคลอรีนที่จะต้องเติม ในสัดส่วนที่สอดคล้องกับปริมาณแอลจีที่มีอยู่ เพื่อรักษาให้มีปริมาณคลอรีนตกค้างอยู่ในน้ำได้คงที่

การที่แอลจีสามารถเพิ่มพีเอชของน้ำได้นี้เอง ที่ทำให้เกิดฟล็อคที่ไม่ดี เมื่อเติมสารส้ม เช่นพีเอชของน้ำดิบอาจเพิ่มจาก 7.0 ไปเป็น 10.0 ได้ ในช่วงที่พีเอชสูง ปริมาณสารส้มที่ใช้ปกติย่อมไม่เพียงพอที่จะลดพีเอชให้ถึงจุดที่จะทำให้เกิดฟล็อค ดีขึ้นได้

นอกจากนี้แอลจีสีเขียวอมน้ำเงินหลายๆ ชนิด สามารถสร้างเกราะที่เป็นเมือกสื่นห่อหุ้มบักเตรี และอาจรวมถึงพวกโคไลฟอร์ม และเชื้อโรคต่าง ๆ เช่น Salmonella ให้รอดพ้นจากการฆ่าเชื้อโดยวิธี Chlorination ได้

ถึงแม้ว่า เป็นการยากที่จะกำหนดขีดจำกัดของปริมาณแอลจี แต่การประปานครหลวงแห่งบอสตัน ก็ได้กำหนดปริมาณแอลจีสูงสุด ที่ยินยอมให้ได้ ก่อนจะเริ่มขบวนการในระบบประปา ดังนี้คือ (35)

ชนิด	หน่วยมาตรฐานต่อมิลลิลิตร
Aphanizomenon	1,000
Anabaena	600
Cryptomonas	200
Chalamydomonas	10
Dinobryon	500
Synura	200
Ureglonopsis	200

2.2.3 แอลจีอุดตันเครื่องกรอง

เมื่อน้ำไหลผ่านเครื่องกรองทรายในระบบบำบัดน้ำ อนุภาคของเซ็งและคอลลอยส์ (colloid) ซึ่งกระจายอยู่ในน้ำจะไปติดค้างอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดทรายเหล่านี้ เป็นสาเหตุหลักอันหนึ่งของการอุดตันของเครื่องกรอง

โดยส่วนใหญ่แล้ว แอลจีและอนุภาคอื่นๆ มีอยู่มากพอ ตลอดทั้งมีที่จะทำให้น้ำต้องผ่านการโคแอกกูเลชั่น และการตกตะกอนก่อนจะผ่านเครื่องกรองทราย ถ้าไม่มีระบบบำบัดก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องกรองๆ จะอุดตันอย่างรวดเร็ว

การโคแอกกูเลชั่น และการตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพอาจช่วยลดปริมาณแอลจีจากน้ำได้สูงถึง 90 - 95 % แต่แอลจีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำอาจมีมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสูญเสียเฮด (head loss) ในเครื่องกรอง เครื่องกรองที่อุดตันก็จะต้องหยุด

ทำงานเพื่อทำความสะอาด ระยะการทำงานของเครื่องกรองโดยปกติจะอยู่ในช่วง 30 – 100 ชม. ก่อนจะต้องทำความสะอาดเครื่อง ในขณะที่มีแอลจี เครื่องกรองจะมีระยะเวลาการทำงานที่สั้น อาจจะน้อยกว่า 10 ชม. (40-42) ในกรณีที่รุนแรงมากๆ การอุดตันอาจทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการล้างย้อนกลับมาก เกินกว่าปริมาณน้ำที่กรองได้ ดังนั้นแอลจีจึงอาจทำให้ขบวนการบำบัดน้ำช้าลง และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น นอกจากนี้ การใช้สารเคมีจะทำให้เม็ดทรายจับตัวกัน ยากต่อการล้างอีกด้วย

ทั้งเครื่องกรองทรายช้า และเครื่องกรองทรายเร็ว อาจถูกอุดตันได้ ด้วยหากแต่แบบกรองช้า แอลจีและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ อาจมีบทบาทที่เกิดประโยชน์ ในขบวนการบำบัดได้ แต่ไดอะตอมซึ่งเป็นแอลจีชนิดหนึ่ง ก็อาจอุดตันเครื่องกรองช้าได้ เพราะมีผนังเซลล์แข็งนั่นเอง

ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันอย่างแน่ชัดว่า เหตุใดแอลจีชนิดหนึ่งๆ จึงสามารถลดการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผ่านเครื่องกรองได้มากกว่า แอลจีชนิดอื่น ความสามารถในการเกิดขึ้นได้ในปริมาณมากๆ ก็เป็นสาเหตุอันหนึ่งได้ หรือผนังที่แข็ง ดังเช่นพบในไดอะตอม, วัตถุเป็นเมือกที่หุ้มรอบเซลล์ ดังในกรณีของ Palmella, และแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดกลีด หรือแผ่เป็นแผงตาข่ายต่อเนื่องกันเช่น Fragilaria และ Tribonema ก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งๆ ได้เช่นกัน

ไดอะตอมมีอยู่ทุกฤดูกาลในแต่ละปี และจัดเป็นกลุ่มที่อุดตันเครื่องกรองที่สำคัญที่สุดได้แก่ Asterionella, Fragilaria, Tabellaria และ Synedra เป็นต้น ส่วนไดอะตอมชนิดอื่นๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาเป็นครั้งคราว ได้แก่ Navicula, Cyclotella, Diatoma และ Cymbella (40) ผนังเซลล์ที่แข็งของไดอะตอมประกอบด้วยซิลิกา (Silica) เป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งยังไม่ย่อยสลายอีกด้วย ดังนั้นถึงแม้ว่า ไดอะตอมอาจจะตายอย่างรวดเร็วบนผิวของเครื่องกรองทรายก็ตาม แต่ผนังซิลิกาก็ยังคงอุดตามรูพรุนของทรายอยู่นั่นเอง

ในชิคาโก เมื่อกรองน้ำที่มี Tabellaria และ Fragilaria อยู่เป็นส่วนใหญ่ และมีจุลชีพอยู่ประมาณ 700 ต่อ 1 ลบ.ซม. ระยะการกรองของเครื่องลดลงเหมือนเพียง 4.5 ชม. แต่ 3 วันต่อมา เมื่อนับปริมาณจุลชีพแล้วเหลือเพียงประมาณ 100 ต่อ 1 ลบ.ซม. ระยะเวลาการกรองกลับเพิ่มขึ้นเป็น 41 ชม. (3)

แอลจีสีเขียวอมน้ำเงิน(blue-green algae)ซึ่งสามารถอุดตันเครื่องกรองได้ ได้แก่Anacystis(Chroococcus type), Rivularia, Anabaenaและ Oscillatona เป็นต้น พวกแฟลกเจลเลท(flagellates)ก็ได้แก่Dinobryonและ Trachelomonasแอลจีเขียวที่ทำให้เครื่องกรองอุดตัน ได้แก่Chlorella, Palmella, Spirogyraและพวกdesmid เช่นClosteriumในขณะที่Tribonemaเป็นเส้นใยสีเขียวเหลือง(yellow-green filament)

จุลชีพส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำซึ่งไหลผ่านเครื่องกรองทรายเร็วมักจะถูกดักติดอยู่ในทรายชั้นบนลึกประมาณครึ่งนิ้ว ที่เล็ดรอดลึกลงไปในชั้นกรองมากกว่านั้นมีน้อยมากส่วนใหญ่จะแตกสลายอย่างรวดเร็ว เมื่อกระทบเข้ากับทราย แต่ถ้าเวลาการกรองนานๆขึ้นเปอร์เซนต์จุลชีพที่เล็ดรอดลงลึกกว่าครึ่งนิ้วก็จะยิ่งมีมากขึ้น แอลจีที่ก่อให้เกิดปัญหาอุดตันก็พบว่าสามารถหลุดรอดออกไปกับน้ำที่ผ่านการกรองแล้วได้ด้วย แอลจีที่สามารถผ่านเครื่องกรองเร็วได้แก่ Synedra และOscillatoria ส่วนพวกที่ผ่านเครื่องกรองทรายช้า ได้แก่Chlamydomonas, Euglena, Navicula, Nitzschia, Phacus และTrachelomonas ความยากง่ายที่แอลจีจะสามารถเล็ดรอดผ่านไปได้ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายอย่างที่สำคัญก็ได้แก่ อัตราการไหล, ขนาดของทรายที่ใช้ และชนิดของจุลชีพ เช่นแอลจีที่เล็กมากๆและพวกมีหนวด(flagellates)สามารถผ่านไปได้ง่ายกว่าชนิดอื่นๆการล้างย้อนกลับบ่อยๆแม้ว่าเครื่องกรองยังไม่อุดตัน จะช่วยกำจัดแอลจีและลดปริมาณที่อาจจะหลุดติดไปกับน้ำที่กรองแล้ว ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการกำจัดแอลจีในเครื่องกรองทราย และ Anthrafilt filter

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบการกำจัดแอลจีของเครื่องกรองทรายและAnthrafilt filters[4]

ระดับความลึกจากผิวของชั้นกรอง (นิ้ว)	ทรายกรอง (จำนวนแอลจี/ลบ.ซม.)	Anthrafilt filter (จำนวนแอลจี/ลบ.ซม.)
2	380	359
4	468	594
6	271	25
12	25	140
24	22	37
36	4	10

009817

แอลจีที่อุดตันเครื่องกรองชนิดสำคัญๆ 43 ชนิด ดังแสดงและรวบรวมไว้ในตารางที่ 2 (40) ข้างล่างนี้

ตารางที่ 2 *-Filter Clogging Algae*

Group and Algae

Blue-Green Algae (Myxophyceae):
- Anabaena flos-aquae
- Anacystis dimidiata (Chroococcus turgidus)
- Gloeotrichia echinulata
- Oscillatoria amphibia
- Oscillatoria chalybea
- Oscillatoria ornata
- Oscillatoria princeps
- Oscillatoria pseudogeminata
- Oscillatoria rubescens
- Oscillatoria splendida
- Rivularia dura

Green and Yellow-Green Algae (nonmotile Chlorophyceae, etc.):
- Chlorella pyrenoidosa
- Cladophora aegagropila
- Closterium moniliferum
- Dichotomosiphon tuberosus
- Dictyosphaerium pulchellum
- Hydrodictyon reticulatum
- Mougeotia sphaerocarpa
- Palmella mucosa
- Spirogyra porticalis
- Tribonema bombycinum
- Ulothrix variabilis
- Zygnema insigne

Diatoms (Bacillariophyceae):
- Asterionella formosa
- Cyclotella meneghiniana
- Cymbella ventricosa
- Diatoma vulgare
- Fragilaria crotonensis
- Melosira granulata
- Melosira varians
- Navicula graciloides
- Navicula lanceolata
- Nitzschia palea
- Stephanodiscus binderanus
- Stephanodiscus hantzschii
- Synedra acus
- Synedra acus var. radians (S. delicatissima)
- Synedra pulchella
- Tabellaria fenestrata
- Tabellaria flocculosa

Pigmented Flagellates (Chrysophyceae, etc.):
- Dinobryon sertularia
- Peridinium wisconsinense
- Trachelomonas crebea

2.2.4 ปัญหาอื่นๆเนื่องจากแอลจี

แอลจีซึ่งมีอยู่กระจัดกระจายทั่วไปในแหล่งน้ำ รวมทั้งลักษณะสมบัติในการอยู่รวมกัน ทำให้แอลจีส่งผลกระทบถึงสิ่งแวดล้อมในหลายๆด้าน ได้แก่:-

1) slime การเกิด slime มีสาเหตุมาจากแอลจี,บักเตรี และจุลชีพอื่นๆ หลายชนิดด้วยกันแอลจีที่ก่อให้เกิด slime มีบทบาทสำคัญในอ่างเก็บน้ำเขมเปิด slime ของแอลจีโดยทั่วไป เกิดจากลักษณะเป็นเมือกของเปลือกที่หุ้มเซลล์ โดยแอลจีชนิด blue-green algae มักเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิด slime นอกจากนี้ไดอะตอม,แอลจีสีเขียว และแดง รวมทั้งพวกแฟลกเจลเลท บางชนิดก็สามารถสร้างเปลือก หรือแคปซูลลักษณะเป็นเมือกสิ่นๆได้ ปัญหาการเกิด slime จะมีข้อยุ่งยากเมื่อต้องใช้น้ำในโรงงานกระดาษ และอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้เสียหายต่อขบวนการผลิต และเป็นที่รังเกียจแก่ผู้ใช้น้ำที่มีแผ่น slime หลุดติดมา

2) ทำให้เกิดสี น้ำที่ผ่านขบวนการบำบัดเรียบร้อยแล้วถูกแอลจีก่อให้เกิดปัญหาเกิดสี อาจพบได้บ่อยในกรณีที่ถังน้ำไม่มีฝาปิด หรือขบวนการบำบัดไม่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอลจี สีที่เกิดอาจมีตั้งแต่ สีเขียวเหลือง จนถึงสีเขียว,สีน้ำเงิน,แดง,น้ำตาล ไป-จนถึงสีดำ ล้วนแล้วแต่อาจเกิดเนื่องจากแอลจีได้ทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตาม อาจมีสารบางอย่างนอกเหนือจากแอลจี ที่อาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องสีได้

3) ทำให้เกิดการกัดกร่อน บางครั้งแอลจีก่อให้เกิดการกัดกร่อนอาจโดยทางตรง ณ ที่ที่เกิดหรือโดยทางอ้อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนทางกายภาพ หรือเคมี อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนโลหะ หรือแม้แต่คอนกรีต

4) ทำให้เกิดน้ำเป็นพิษ แอลจีในน้ำจืดที่มีรายงานว่าเป็นอันตราย ได้แก่ ทำให้เกิดอาการคันตามผิวหนัง และเป็นสาเหตุของโรค "hay fever" โดยมีรายงานว่าเกิดจากแอลจีสีเขียว-น้ำเงิน คือ Anabaena ทำให้เกิดอาการคันเมื่อร่างกายไปสัมผัส Anacystis (Microcystis) และ Lyngbya contorta ก็เป็นต้นเหตุของ "hay fever".

นอกจากนี้ อาจเป็นไปได้อีกว่าการสลายตัวของแอลจีสีเขียว-น้ำเงินปริมาณมากๆ บนเครื่องกรองทราย และผลผลิตที่เป็นพิษซึ่งผ่านเข้าไปสู่ระบบส่งจ่ายน้ำ อาจเป็นสาเหตุของ gastro-intestinal disturbances.(37)

มีบันทึกรายงานถึงผลเป็นพิษเฉียบพลันของปศุสัตว์ ซึ่งดื่มน้ำจากสระที่มีแอลจีเติบโตอยู่เป็นจำนวนมาก สัตว์ที่มีอาการรวมไปถึง ม้า,วัว,ควาย,สุนัข,แกะ,แพะ,กระต่าย และสัตว์ปีกทั้งหลาย กรณีดังกล่าวส่วนใหญ่มีสาเหตุจาก Anacystis (Microcystis) และเกิดเฉพาะในช่วงฤดูร้อนซึ่งมีแอลจีเติบโตได้มากเท่านั้น อาการดังกล่าวอาจทำให้สัตว์เลี้ยงถึงตายได้

2.3 ไดอะตอม

ไดอะตอม เป็นแอลจีเซลล์เดี่ยวโดยส่วนมาก ถึงแม้ว่าอาจจะอยู่ในรูปเส้นใย และอยู่รวมกันเป็นกลุ่มบ้างก็ตาม โดยมีผนังเซลล์เป็นซิลิกา หนาบางต่างกันไปตามแต่ชนิด อาจเป็นได้ทั้งแบบแพลงตอน และชนิดเกาะติดกับวัสดุ

เนื่องจากไดอะตอมทุกชนิดขับถ่ายสารที่เป็นเมือกคล้ายกับวุ้นหุ้มรอบผนังเซลล์ได้ จึงอาจเติบโตอยู่ตามลำพัง,เป็นกลุ่มก้อน หรือต่อเป็นเส้นยาวได้ วุ้นดังกล่าวนี้ยังเป็นกลไกในการ

ให้สารอาหารเกาะติดอยู่ได้ แม้ในกระแสน้ำที่ไหลแรง.(35)

ไดอะตอมต้องการซิลิกาในปริมาณความเข้มข้นมากกว่า0.5มก./ลบ.ดม.(35) ต้องการเหล็กในปริมาณเพียงเล็กน้อย และเติบโตได้ดีในอุณภูมิ 15-30°ซ. ในช่วงที่มีการเติบโตสูงสุด จะพบว่าปริมาณซิลิกาจะลดน้อยลง

ไดอะตอมทำให้เกิดสี,กลิ่น และรสในน้ำได้ และยังทำให้อายุการกรองสั้นลงอีกด้วย มีบันทึกไว้ว่าเมื่อไดอะตอมมีการเติบโตได้ดีมากๆ อายุการกรองลดลงจาก 50-110 ชม. ลงเหลือเพียง 5ชม. เท่านั้น และอีกฉบับรายงานว่า เมื่อ(35) Synedra 4,800เซลล์/มล.ทำให้ลดอายุการกรองลงจากปกติ 50ชม. เหลือเพียงไม่ถึงหนึ่งชั่วโมง พบว่าถ้ามี Synedraในน้ำก่อนเข้าระบบประปา ไม่เกิน 20เซลล์/มล. ไม่มีปัญหายุ่งยากใดๆเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่บัลติมอร์(35) เมื่อนับปริมาณไดอะตอมได้ค่าสูง แต่ก็กลับไม่เกิดปัญหายุ่งยากแก่เครื่องกรองแต่ประการใดในอ่างเก็บน้ำ Loch Raven(35) ค่าพีเอชของน้ำเปลี่ยนจาก7.0 ไปเป็น9.0 ในบริเวณที่พบว่ามีไดอะตอมเกิดขึ้นมากมาย และพีเอชมีค่าเป็นปกติ ในที่ ที่ไดอะตอมมีน้อยมาก

Gamet และ Radematcher(35) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการกรองของน้ำในมิชิแกน และปริมาณไดอะตอมโดยทั่วไป มีความสัมพันธ์กันอยู่ระหว่าง ปริมาณที่มีมาก และอายุการกรองที่สั้นลง แต่ก็ยังมีกรณียกเว้นพบว่า Tabellaria มีอิทธิพลต่อการอุดตันของเครื่องกรอง มากที่สุดในจำนวนชนิดของไดอะตอมที่ทำการศึกษา ผลการศึกษาสรุปว่า Asterionella และ Fragilaria เป็นตัวก่อให้เกิดปัญหารสและกลิ่นในขณะที่Tabellaria, Synedra และ Melosiraเป็นตัวอุดตันของเครื่องกรอง MelosiraและCyclotella ยังเป็นตัวอุดตันเครื่องกรองทรายอย่างรุนแรงและสามารถทะลุผ่านชั้นทรายกรองได้ลึกพอควร.(21)

ไดอะตอมอาจเกิดได้ในที่ที่ฟอสเฟตมีความเข้มข้น"ต่ำมากๆ"หากแต่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นก็สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตได้ ปริมาณของไดอะตอมสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกลับกับความเข้มข้นของไนเตรต-ไนโตรเจน,และไม่สัมพันธ์กันกับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน Bamforth(35) รายงานว่า ไดอะตอมเติบโตได้ที่มีฟอสเฟตความเข้มข้น0.02มก./ลบ.ดม. และไดอะตอมยังชอบอยู่ในน้ำที่มีฤทธิ์เป็นด่างมากกว่าเป็นกรด โดยฤดูกาลแล้วจะเติบโตได้มากในฤดูใบไม้ผลิและจะมีแอลจีสีเขียว หรือเขียวอมน้ำเงิน แทนที่ในฤดูร้อน หลังจากนั้นจึงจะเริ่มมีขึ้นอีกในฤดูใบไม้ร่วง.

การประปานครหลวงแห่งบอสตัน ได้กำหนดมาตรฐานสูงสุดของไดอะตอมก่อนเข้าสู่กระบวนการ ไว้ดังนี้.- (35)

Asterionella	3,000	เซลล์/มล.
Tabellaria	2,500	"
Synedra	3,000	"

ไดอะตอม จัดเป็นอาหารของพวกโปรโตซัว , crustacea, insect lavae เป็นต้น และยังชอบเกาะอยู่บน living epiphytic เช่น Synedra ชอบเกาะอยู่บนเส้นใยของ Oedogonium โดยไม่เกาะบน Spirogyra , Gomphonema ชอบเกาะอยู่บน Cladophora , Oedogonium และแอลจีอื่น ๆ โดยก้านุโปร่งใสสั้น ๆ (18)

ไดอะตอมขนาดใหญ่ ๆ สามารถถูกกำจัดได้โดยง่ายโดยการกรอง เช่น Synedra และ Nitzchia แต่พวกที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถลอดทะลุเครื่องกรองได้ เช่น Cyclotella และ Stephanodiscus sp. เป็นที่รู้จักกันดีว่า สามารถอุดตันเครื่องกรองทรายช้า ในขณะที่ Melosira ซึ่งเป็นเส้นใยค่อนข้างใหญ่ มักจะเป็นปัญหาอุดตันกับเครื่องกรองเร็ว หรือ microstrainer ในขณะที่ Amphora และCymbella สามารถเติบโตเพิ่มจำนวนได้รวดเร็ว จนสามารถอุดตันเครื่องกรองทรายช้าได้ภายในไม่กี่วัน (23)

2.4 ภาวะแวดล้อมของชุมชนแอลจี

องค์ประกอบของสิ่งแวดล้อมอันมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต และการกระจายของจุลชีพ ซึ่งในที่นี้เน้นเฉพาะแอลจี ประกอบด้วย:-

2.4.1 อุณหภูมิ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่แผดเผาแหล่งน้ำทำให้เกิดการแบ่งชั้นขึ้นได้ โดยผิวบนมีความหนาแน่นน้อยกว่า เรียกว่าชั้น epilimnion ลอยอยู่บนผิวน้ำซึ่งเย็นกว่ามีความหนาแน่นเรียกว่า hypolimnion เขตที่คั่นอยู่ระหว่างสองชั้นน้ำนี้เรียกว่า thermocline การแบ่งชั้นดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นโดยทั่วไปในทะเลสาบลึกในช่วงฤดูร้อน ถ้า thermocline อยู่ในสภาวะถาวร ก็จะยิ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมผลผลิตของระบบนิเวศน์เป็นอย่างยิ่ง ในสภาพคงตัวจะมีการผสมกันระหว่างชั้นน้ำบนและล่างอย่างจำกัดมาก ในชั้นที่แสงแดดส่องถึงของ epilimnion ซึ่งมีสารสังเคราะห์แสงได้ อาจเกิดการขาดแคลนอาหารเสริม (nutrients) ในขณะที่ลึกลงไปคือชั้น hypolimnion จะมีอยู่ค่อนข้างมาก

สำหรับแม่น้ำ มีการผสมผสานกันอย่างดี แต่ความปรวนแปร ของอุณภูมิในมวลของน้ำทั้งหมด ก็มีค่ามากอยู่เสมอ เพราะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรในอัตราสูง ในทางตรงกันข้าม ความแตกต่างของอุณภูมิในทะเลสาบและมหาสมุทรขนาดใหญ่มีค่าน้อยมาก การเปลี่ยนอุณภูมิตามฤดูกาลจะมีผลต่อน้ำในช่วงความลึก 10 - 20 ม. เท่านั้น และช่วงอุณภูมิก็ต่างกันเพียงประมาณ 10 ซ.

2.4.2 ก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำ และพีเอช น้ำสามารถแตกตัวเกิดไฮดรอกโซเนียม (H_3O^+) และไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ไฮโดร เจนอิออนเองไม่ได้เกิดขึ้นอยู่ในน้ำ แม้ว่ามักจะถูกอ้างแทนไฮดรอกโซเนียมอยู่เสมอ สารประกอบซึ่งละลายแล้วให้ไฮโดรเจนอิออน จะมีผลกระทบถึงพีเอชอย่างมาก สำหรับน้ำตามธรรมชาติ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวสำคัญที่สุด ปฏิกิริยาที่สามารถเป็นไปได้ ได้แก่สองสมการต่อไปนี้:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \quad \ldots\ldots(2.4)$$

$$CO_2 + OH^- \rightleftharpoons HCO_3^- \quad \ldots\ldots(2.5)$$

โดย H_2CO_3 เองก็สามารถแตกตัวได้มากดังนี้:

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{=} \quad \ldots(2.6)$$

ปฏิกิริยาเหล่านี้ล้วนอยู่ในสมดุลย์ ดังนั้นความเข้มข้นของคาร์บอนอนินทรีย์จะเป็นตัวกำหนดค่าพีเอช การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ไบคาร์บอเนตในระหว่างการ - สังเคราะห์แสง จะทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้นและในทางกลับกัน การหายใจ (respiration) ซึ่งมีการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะทำให้พีเอชลดลง น้ำซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะไปละลายหินปูนออกมาในรูปแคลเซี่ยมไบคาร์บอเนต แต่ก็อาจตกตะกอนออกมาในรูปคาร์บอเนตอีกได้ ถ้าคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกำจัด และพีเอชสูงขึ้น:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.7)$$

ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามแนวดิ่งจะตรงกันข้ามกับปริมาณของออกซิเจน กล่าวคือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำ ณ ผิวน้ำและเพิ่มมากขึ้นตามความลึก และมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนเนื่องจากมีการแบ่งชั้นน้ำนั่นเอง การสังเคราะห์แสง ทำให้ความเข้มข้นปรวนแปร และลดลงในระหว่างที่มีแสงสว่าง

ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของอากาศที่อยู่เหนือผิวน้ำ, อุณหภูมิและความเค็ม (salinity)เช่น ที่อุณหภูมิ 16°ซ. และความดันบรรยากาศปกติ ในน้ำทะเล มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเป็น5.9มก./ลบ.ดม.และ7.2มก./ลบ.ดม. ในน้ำจืดที่ใกล้ผิวน้ำออกซิเจนอาจมีเกินกว่าจุดอิ่มตัว เนื่องจากมีการสังเคราะห์แสง แต่ความเข้มข้นก็จะลดลงตามความลึกและมีค่าต่ำสุดที่เขตแสงแดดส่องไปไม่ถึง (photiczone) เนื่องจากการใช้ออกซิเจนของบักเตรีซึ่งมักจะมีปริมาณสูงที่สุด ณ บริเวณนั้น

ตามแม่น้ำและแหล่งน้ำซึ่งมีการถ่ายเทมักจะมีการกระจายของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์สม่ำเสมอมากกว่า ในกระแสน้ำที่ไหลเร็วและใส ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนอาจใกล้เคียงกับค่าอิ่มตัว แต่ถ้ามีการผสมแบบ turbulent เพียงเล็กน้อย หรือน้ำมีอินทรีสารอยู่ในปริมาณมาก(อาจเนื่องมาจากมีน้ำทิ้ง หรือจากธรรมชาติเช่นใบไม้เป็นต้น) ดังนั้น ระดับออกซิเจนจึงมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของแม่น้ำและกระแสน้ำที่ไหลช้า

2.4.3 <u>แสงแดด</u> ปริมาณแสงแดดที่ส่องถึงผิวน้ำ มีผลต่ออุณหภูมิ และผลิตผลของภาวะแวดล้อมในน้ำ ฝุ่นผงจะทำให้แสงกระจาย ยิ่งถ้าน้ำมีความขุ่นมากๆ แสงแดดก็อาจส่องลงไปได้ลึกเพียงไม่กี่เซนติเมตรเท่านั้น แต่โดยทั่วไป 50 เปอร์เซนต์ของแสงแดดส่องลงไปได้ลึกถึง 3-4 เมตร จากผิวน้ำ ในทะเลสาปที่แม้จะสะอาดที่สุด เขตที่แสงแดดส่องถึงอาจลึกไปถึง 200 เมตร แต่โดยปกติ 10 เปอร์เซนต์ของแสงแดด สามารถส่องได้ลึกถึง 45 เมตร แม้แต่ในน้ำที่ดูแล้วใส

ถึงแม้ว่าแสงแดดจะมีความสำคัญกับสิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองได้โดยการใช้แสง แต่ก็อาจก่ออันตรายให้กับจุลชีพได้ แต่ผลกระทบนี้ก็มีน้อย และจะมีผลก็แต่ในน้ำตื้น (ลึก--น้อยกว่า 20 เมตร) แสงแดดที่กล้ามากอาจมีผลต่อความเป็นไปของบักเตรีโดยไม่ถึงกับทำให้ตาย

การแบ่งเซลล์อาจจะสัมพันธ์กับช่วงเวลากลางวัน หรือความยาวของเวลากลางคืน เช่น ไดอะตอม Nitzchia แบ่งเซลล์ในขณะที่มีแสงแดดเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่พวก -dinoflagellate Ceratium แบ่งเซลล์ในขณะไร้แสง ปฏิกิริยาของจุลชีพต่อแสงสว่างถึงไม่ใช่ขึ้นอยู่กับแสงสว่างเพื่อการสังเคราะห์แสง โดยธรรมดาๆเท่านั้น แต่ค่อนข้างจะสลับซับซ้อนและกินวงกว้าง ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่ก็ไม่เป็นที่เข้าใจกันดีมากนัก

2.4.4 <u>องค์ประกอบอื่นๆ</u> นอกจาก อุณหภูมิ, ก๊าซที่ละลายในน้ำ และพีเอช, แสงแดด จะเป็นองค์ประกอบในการเติบโตและชนิดของแอลจีแล้ว องค์ประกอบอย่างอื่น ยังได้แก่ ความขุ่น, ซัลเฟต (ต้องมากกว่า 0.5 มก./ลบ.ดม.) ความเร็วของน้ำ, ซิลิกา, ไนเตรต, ฟอสเฟต, แมงกานีส, โปรตีน ซึ่งให้แอมโมเนีย, สารอินทรีย์ที่สามารถถูกออกซิไดส์ได้, ความเป็นด่าง, เหล็ก, และคาร์บอน, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส ในปริมาณพอเหมาะ[35] โดยฟอสฟอรัส มักมักจะถูกพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบที่วิกฤติต่อการเติบโตของแพลงตอนเป็นอย่างมาก สำหรับแอลจีบางชนิด ต้องการอัตราไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส = 30 : 1 เป็นค่าเหมาะสม บางชนิดก็ต้องการในขนาด 15- 18 :1 Sawyer[35] ได้แนะนำว่า 0.01 มก./ลบ.ดม.ของ อนินทรีย์-ฟอสฟอรัส เป็นค่าความเข้มข้นสูงที่สุด ที่จะยอมให้ได้โดยไม่ทำให้เกิดการเติบโตมากเกินความต้องการ

Fitcher[35] รายงานว่า มีแพลงตอนในน้ำใส, น้ำขุ่นปานกลาง, ตามลำดับ เป็น 13 เท่าและ 1.5 เท่า ของปริมาณแพลงตอนที่มีในน้ำที่ขุ่นเป็นโคลนตม ของสระในโอกลาโฮมา

ที่ความขุ่นมากกว่า 30 ppm สามารถหยุดยั้งการส่องถึงของแสงแดดได้ ยกเว้นในช่วงน้ำตื้นๆ

อนึ่ง ความเร็วของกระแสน้ำ และลักษณะพื้นของแหล่งน้ำ (bottoms)ยังเป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อพืช และสัตว์ด้วย เช่นที่ความเร็วต่ำๆจะสร้างรูปเป็นคอลลอยด์หนา McIntire[34] ทดลองเปรียบเทียบพบว่าที่ความเร็วของน้ำ 90 มม./วินาที จะเกิดเส้นใยยาวเกาะอย่างหลวมๆ โบกไปมาตามกระแสน้ำบนอาหาร (Substrate) แต่ที่ความเร็ว

380 มม./วินาที ไดอะตอม จะฟอร์มตัวกันอย่างหนาแน่น บน Substrate ลักษณะผิวของ Substrate ก็สำคัญเช่นกัน กล่าวคือ หินทราย ที่มีผิวหยาบ จะเหมาะสมต่อการเกาะกลุ่มกันเร็ว และมากกว่า บนผิวเรียบๆ นั้นก็เพราะอนุภาคถูกจับติดเกาะกับผิวหยาบได้ง่ายกว่านั่นเอง.

2.5 การก่อตัวของกลุ่มสิ่งมีชีวิต (Biofilm formation)

การเกิดแผ่นฟิลม์ของแอลจีและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ถูกพิจารณาให้ขึ้นอยู่กับ 2 องค์ (6) ประกอบคือ

1. ความถี่ของการสัมผัสระหว่างผิวที่เกาะติดกับ สิ่งมีชีวิต ซึ่งในที่น้ำคือแอลจี ซึ่งความถี่ดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอลจีในน้ำดิบ, ลักษณะสมบัติของอนุภาค-แอลจี และลักษณะของกระแสน้ำที่ไหลผ่าน กล่าวคือ ถ้าแอลจีในน้ำดิบมีปริมาณสูง ก็มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดฟิลม์ได้มากขึ้น แต่ถ้าแอลจีเป็นพวกที่เคลื่อนไหวได้ โอกาสที่จะว่ายไปตามกระแสน้ำก็มีมากกว่าพวกเกาะติดอยู่กับที่ นอกจากนี้ ถ้าน้ำไหลด้วยความเร็วต่ำ แอลจีก็จะสามารถเจริญเติบโตเกาะติดกับผิวสัมผัสได้ง่าย แต่ถ้าน้ำไหลแรง โอกาสที่แผ่นแอลจีจะถูกชะไปกับกระแสน้ำก็เป็นไปได้มาก เหล่านี้เป็นต้น.

2. ความสามารถในการเจริญเติบโตของแอลจี ซึ่งจากการศึกษา สมมุติให้แสงสว่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นของอาหารเสริมอนินทรีย์ เป็นตัวควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของแอลจี และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำ. (58)

จากการศึกษาโมเดลของ trickling filter (24) ซึ่งเป็นขบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหนึ่งพบว่า ปริมาณแผ่นฟิลม์ที่สะสมในเครื่องกรอง ปรวนแปรไปตามฤดูกาล นั่นคือ เพิ่มขึ้นในฤดูหนาว และลดลงในฤดูร้อน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ปรวนแปร และนำมาพิจารณาได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของความตื่นตัวของจุลชีพตามอุณหภูมิ และการกินอาหารของสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ขึ้นอันเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น พวก Microcrustaceans ซึ่งมีมากในฤดูหนาว กินไดอะตอมและแอลจีอื่น ๆ เป็นอาหาร ทำให้แผ่นฟิลม์สะสมน้อยลง องค์ประกอบอื่น ๆ นอกเหนือจาก อุณหภูมิก็ได้แก่ อัตราการไหล และภาระอินทรีย์ (organic loading) อัตราการไหล มีผลต่อแรงเฉือนทางอุทกศาสตร์ (hydraulic shear) ของน้ำ ต่อฟิลม์ นั่นคือ ของแข็งแขวนลอยที่ถูกชะออกจากเครื่องกรอง เมื่อแผ่นฟิลม์มีค่าถึงค่าสูงสุด

ค่าหนึ่ง ก็จะลดลง เนื่องจากองค์ประกอบ 2 อย่าง คือ ถูกกระแสน้ำชะหลุดไป และเกิดการสลายตัวแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic decomposition) ที่ส่วนล่างสุดของแผ่นฟิลม์.

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง เมตาโบลิซึมของแอลจีสีเขียวน้ำเงินจะถูกหน่วงให้น้อยลงแต่จะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 15 ซ. สำหรับความเข้มของแสงในภาวะเหมาะสมของแอลจีสีเขียวน้ำเงิน ต่ำกว่า ของแอลจีสีเขียว ดังนั้น แม้ที่มืดสนิทแอลจีสีเขียวน้ำเงินก็สามารถเติบโตได้ โดยเป็นพวก heterotrophic และใช้แหล่งอาหารพวกคาร์บอน. (51)

2.6 การป้องกันและการควบคุม

สำหรับน้ำในอ่างเก็บน้ำ มีวิธีการควบคุมอยู่หลายวิธีด้วยกัน นิยมใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำลึกๆ มากกว่าตื้นๆ เพราะสามารถติดตั้งระบบนำน้ำเข้า ณ ความลึกที่เหมาะสม กล่าวคือ ลึกพอที่จะหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีแพลงตอนเติบโตอยู่มากบริเวณใกล้ผิวน้ำ และตื้นกว่า ระดับที่มีการสะสมของตะกอนอินทรีย์ (41,42) แม้ในอ่างเก็บน้ำตื้นๆ ก็อาจหลีกเลี่ยงปัญหาโดยยกระดับท่อน้ำเข้าให้อยู่เหนือก้นอ่าง.

อาจมีการบำบัดควบคุม ก่อนนำน้ำเข้าสู่ระบบประปา โดยการเติบโตคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้นต่ำๆ อย่างสม่ำเสมอ การวิเคราะห์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อย่างสม่ำเสมอเป็นประจำ จะช่วยให้ได้ข้อมูลเพียงพอในการแก้ปัญหาก่อนจะลุกลามต่อไป การปิดฝาถังเก็บน้ำ จะช่วยให้ปัญหาเรื่องแอลจีเบาบางลง แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

เมื่อน้ำดิบมีไนเตรต, ฟอสเฟต และอาหารเสริมอื่นๆ ลดน้อยลง ปริมาณจุลชีพและแอลจีซึ่งเป็นตัวก่อปัญหาก็ลดน้อยลงไป (53)

ในการกำจัดแอลจีในบริเวณ Chesapeake (41) ซึ่งมี Synedra มาก ได้ใช้วิธีโคแอกกูเลชัน โดยการเติมสารส้มในปริมาณมากเกินพอ พบว่า สารส้มเหมาะที่สุดในการควบคุมโดยใช้สารเคมีตัวเดียวโดดๆ สารเคมีอื่นๆ ที่น่าสนใจก็ได้แก่เหล็กซัลเฟต กับปูนขาว และคลอรีน, สารส้ม และ activated carbon จากการตรวจสอบทางกล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีสิ่งมีชีวิตถูกจับอยู่ในฟล็อคของ เหล็ก-คลอรีน-ปูนขาว มากกว่าฟล็อคชนิดอื่น ๆ .

Cohen [42] ได้ทดลองใช้คลอรีน ควบคุมแอลจี พบว่า คลอรีน 0.05 ส่วนในล้านส่วน (ppm) สามารถยับยั้ง Oscillatoria และไดอะตอมได้นาน 8 วัน ที่ความเข้มข้น 0.5 ppm สามารถฆ่า Oscillatoria ได้ภายใน 30 นาที และความเข้มข้น 1.5 ppm สามารถฆ่า Spirogyra ได้ภายใน 3 ชม. โดยทั่วไป คลอรีนปริมาณ 1.1 ppm สามารถควบคุมแอลจีได้ที่จุดนำน้ำเข้า

Winston [42] ได้แนะนำว่า ควรมีการกวาดเอาชั้นสกปรกออกจากผิวของเครื่องกรอง อันจะเป็นวิธีการปฏิบัติที่ให้ผลดีสำหรับระบบประปาขนาดเล็กๆ ควรมีการติดตั้งฟุตวาล์วในถังตกตะกอน และหมั่นกำจัดสลัดจ์ออกจากก้นถังตกตะกอน ซึ่งช่วยในการควบคุมแอลจี รวมทั้งปัญหาเรื่องรสและกลิ่นด้วย.

2.7 ทฤษฎีการกรอง และการกำจัดแอลจี

การกรองเป็นกรรมวิธีทางกายภาพและเคมี สำหรับแยกตะกอนแขวนลอย และคอลลอยด์ ออกจากน้ำ โดยผ่านน้ำเข้าไปในชั้นทรายหรือตัวกลางอื่นที่มีช่องว่าง สิ่งสกปรกจะถูกทิ้งไว้ในช่องว่าง และน้ำที่กรองแล้วจะไหลผ่านออกมา

กลไกของการกรองน้ำ ประกอบด้วย [26]

1. การติดค้างในชั้นกรองโดยวิธีกล (mechanical straining)
2. การดูดติดผิว (adsorption)
3. ผลทางไฟฟ้า
4. การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา (biological changed)

เครื่องกรองทรายไม่ใช่"ตะแกรง"ที่ใช้กำจัดสารแขวนลอยที่ใหญ่กว่าช่องว่าง หรือรูพรุน ระหว่างเม็ดทรายเสียทีเดียวนัก ทั้งนี้ เพราะอนุภาคคอลลอยด์ และสารที่ทำให้เกิดสี, บักเตรี มีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง หรือรูพรุนเหล่านั้น การกำจัดอนุภาคประกอบด้วยขบวนการซับซ้อนหลายอย่าง

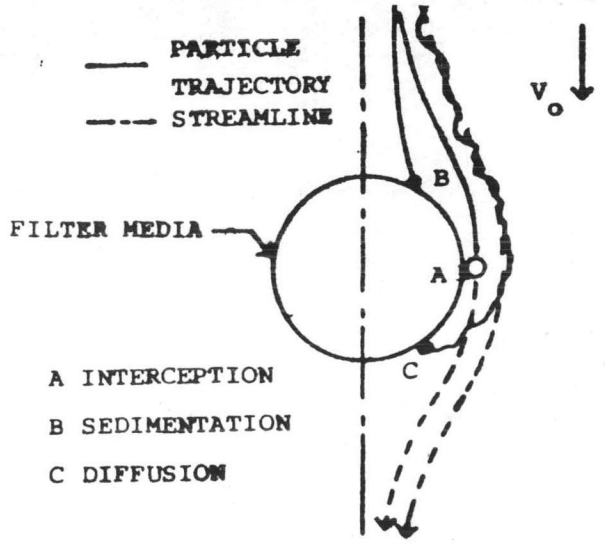
ในการกรองด้วยเครื่องกรองเร็ว การกำจัดอนุภาคโดยส่วนใหญ่เป็นกลไกทางกายภาพ ถึงแม้ว่าจะมีการพิจารณาถึงกลไกทางเคมีกายภาพด้วยก็ตาม ขนาดของตัวกลางในเครื่องกรองโดยปกติอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 มม. [56] ในขณะที่อนุภาคที่อาจถูกกำจัดได้โดยการกรองแบบธรรมดา เช่นอนุภาคของแร่ธาตุ หรือ ไดอะตอม อาจมีขนาดเล็กกว่าถึง 20 เท่า เป็นอย่างน้อย

ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว อนุภาคบางส่วนที่ถูกกำจัดได้อาจเล็กกว่าขนาดของเม็ดทรายถึงหลายร้อยเท่าทีเดียว ถึงแม้ว่าจะมีการเติมสารโคแอกกูแลนท์ เพื่อทำให้เกิดฟล็อค ซึ่งช่วยให้มีการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กๆ ได้ดีขึ้นก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคฟล็อคอาจมีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของทรายกรอง จึงเป็นข้นพิสูจน์ได้อย่างหนึ่งว่า การกรองค่อนข้างจะแตกต่างจากกลไกติดค้างธรรมดาๆ ดังที่เกิดในเครื่องตะแกรงละเอียด (microstrainers) ในหลายๆ กรณีอาจมีกลไกติดค้างอันเนื่องจากผิวกรองมีชั้นเคลือบแต่โดยทั่วไป การกรองก็เป็นขบวนการที่ชั้นกรองลึกลงไปถูกใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ ในการกรองน้ำ การไหลภายในชั้นกรองจะเป็นแบบลามินาร์ (Laminar) หรือ Streamline หัวความดันที่สูญเสียตลอดชั้นกรองจะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของน้ำ.

กลไกการกรองน้ำ การกำจัดสารแขวนลอยโดยการกรองส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ในชั้นสารกรอง โดยเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กการกำจัดขึ้นอยู่กับกลไก 2 ขั้นตอน คือกลไกการเคลื่อนย้าย (transport mechanism)และการจับติดของสารแขวนลอยกับสารกรอง (Attachment mechamism) (37)

1) กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง

สารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี (ดูภาพที่ 2-1) โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบราวเนียน (Brownion Diffusion).



วิธีที่สอง เป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง(Interception)ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ ยังอาจตกตะกอนในทิศทางนี้ ที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ เมื่อ ขนาดสารแขวนลอยเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกับขนาด นั่นคือ การแพร่กระจายทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีโอกาสวิ่งเข้าหาสารกรองได้มากกว่าสารขนาดใหญ่ เมื่อสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน มีการแพร่กระจายในระดับโมเลกุล น้อยมาก จนไม่มีนัยสำคัญ ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตกตะกอน(Sedimentation)และติดค้าง(Interception)ดังนั้น ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายจึงแปรตรงกับขนาดของสารแขวนลอย เนื่องจากขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก และมีปริมาณมาก จึงตกตะกอน หรือติดค้างสารกรองได้ง่าย.

นอกจากการตกตะกอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วง,การแพร่กระจาย กลไกการเคลื่อนย้ายยังอาจรวมถึงแรงเฉือย และ อุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic action)

กลไกการเคลื่อนย้ายจัดเป็นขบวนการทางกายภาพ – ไฮดรอลิค กลไกนี้จึงมีผลกระทบได้จากลักษณะสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดของสารกรอง,อัตราการกรอง,อุณหภูมิของ ของเหลว, ความหนาแน่นและขนาดของสารแขวนลอย.

2.) กลไกจับสารแขวนลอย (Attachment mechanism)

กลไกนี้อธิบายถึงการติดค้างของอนุภาค เมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้าใกล้สารกรอง หรือสิ่งที่ตกค้างอยู่ก่อนแล้วบนสารกรอง กลไกการจับสารแขวนลอยอาจเกี่ยวข้องกับแรงกระทำ ซึ่งกันและกัน ทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic interaction) และ การเกาะเกี่ยวกันทางเคมี(chemical bridging) หรือ การดูดติดผิวจำเพาะ (specific adsorption) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์สามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือบนสิ่งที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม สารกรองและคอลลอยด์มักมีประจุลบทั้งคู่ จึงต้องมีการทำลายประจุไฟฟ้า ของสารตัวหนึ่งตัวใดก่อน หรือของทั้งคู่ เพื่อมิให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุเดียวกัน ในกรณีของการกรองน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์อยู่ในน้ำ ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ก่อนผ่านเข้าชั้นกรองได้ กลไกทั้งหลายนี้ขึ้นอยู่กับสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้,ลักษณะทางเคมีของน้ำ และสารกรอง.

การกำจัดสารแขวนลอยด้วยกลไกทั้ง 2 แบบ มีผลต่อการกรองน้ำไม่เหมือนกัน การตกตะกอน และการติดค้าง ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพน่าจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นกรอง หรือที่ความลึกไม่เกิน 2-3" จากผิวหน้า ทำให้มีชั้นตะกอนปกคลุมปิดผิวบนของชั้นกรอง

ในระหว่างการกรองน้ำ สารแขวนลอยอาจหลุดออกจากถังกรองได้ด้วยกลไกที่เรียกว่า Detachment กลไกนี้อาจเนื่องจากมีตะกอนบางส่วนเกาะจับหลวมๆบนสารกรอง เมื่อชั้นกรองมีความผิดเพิ่มขึ้น หรืออุดตันมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ก่อให้เกิดแรงเฉือน(shear force) อันทำให้ตะกอนหลุดจากชั้นกรองได้ และเนื่องจากพื้นที่ผิวของสารกรองถูกใช้ไปจนเกือบหมด การถูดติดผิวจะน้อยลง การวิ่งของสารแขวนลอยออกจากชั้นกรองจึงมีมาก

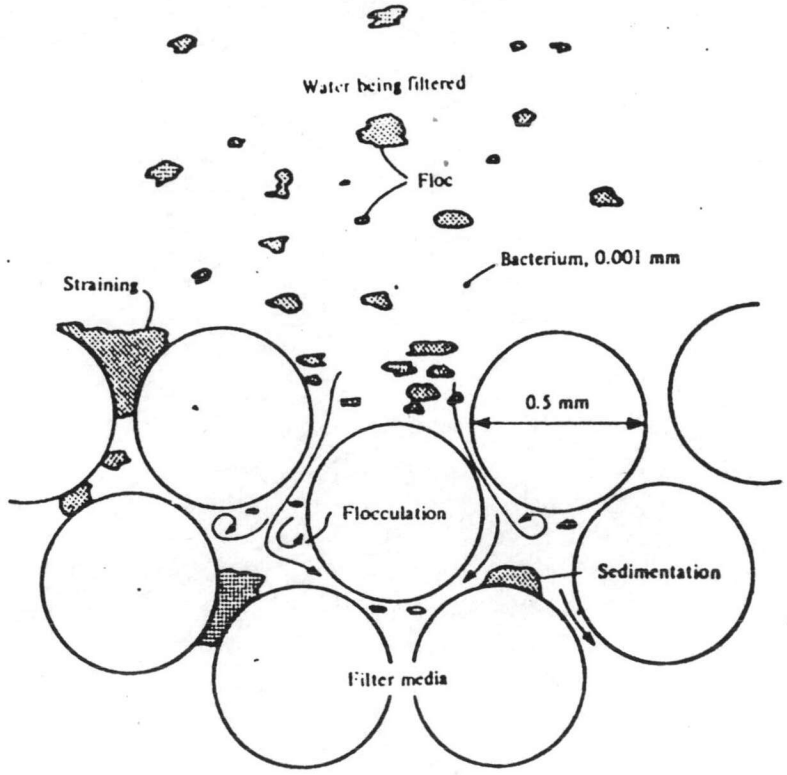
จากการศึกษาค้นคว้าโดย Ives et al.,(56) ได้ผลสรุปอย่างกว้างๆว่า กลไกหลักของการกรองแบบธรรมดา ก็คือ วิธีทางกายภาพ ซึ่งก็คือแรงโน้มถ่วงที่ก่อให้เกิดการตกตะกอน (sedimentation) ,การกีดขวาง (interception) ,ผลทางอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic effect) และการแพร่กระจาย (diffusion) โดยในเบื้องต้นการตกตะกอนของอนุภาคลงสู่ผิวชั้นกรองบนสุดเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด โดยเฉพาะอนุภาคแร่ธาตุที่มีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างสูง และมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 10 ไมครอน และจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ความเร็วในการไหลค่อนข้างต่ำ อนุภาคที่ตกตะกอนส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ในตำแหน่งนั้นๆ ตราบจนถูกแทนที่โดยวิธีการล้างแบบย้อนกลับ

การกีดขวางเป็นอีกกลไกหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเม็ดทรายกรองอยู่ขวางตำแหน่งที่อยู่ของอนุภาคซึ่งอาจจะไหลมากับกระแสน้ำ หรือลอยไปกระทบเข้า ส่วนผลกระทบทางอุทกพลศาสตร์เกิดขึ้นจากรูปร่างอสมมาตรของอนุภาค ซึ่งอาจจะกระทบกับเม็ดทรายกรอง สำหรับอนุภาคที่มีขนาด 1 ไมครอน หรือเล็กกว่านั้น จะมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน (Brownian movement) ดังนั้นการแพร่กระจายจะเป็นกลไกสำคัญในการพาเอาอนุภาคส่วนหนึ่งไปสู่เม็ดทรายกรอง

การวิจัยเกี่ยวกับการกรองยังได้พิจารณาถึงกลไกของการดึงดูด หรือ การผลักกัน (attraction or repulsion) ที่อาจเป็นไปได้ระหว่างอนุภาคและเม็ดทรายกรอง ในกรณีที่ไม่มีแรงดึงดูด อนุภาคบางชนิดมีแนวโน้มที่จะหลุดร่อนออกมา แต่การพิจารณาในกลไกนี้ สลับซับซ้อน และบทสรุปที่เด่นชัด ก็ยังมีอยู่ในวงจำกัด แรงดึงดูดดังกล่าวเกิดจากแรงวันเดอร์วาล (Van der Waal forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล และโดยทฤษฎีก็ใช้ประยุกต์ได้กับวัตถุที่อยู่ในน้ำแทบจะทุกชนิด แต่มีขีดจำกัดก็คือ ต้องมีระยะห่างน้อยกว่า 0.05 ไมครอน

IVES (56) ได้รายงานว่าเนื่องจากเม็ดทราย และอนุภาคมลทินที่มีในน้ำส่วนใหญ่มีค่าศักยภาพซีตา (Zeta potentials) เป็นลบ ปฏิกริยาของ double layer ทางไฟฟ้าจึงมักจะเป็นไปในรูปการขัดขวางการเกาะติดกัน แต่ถ้ามีอิออนของเกลือ (ionised salts) ในน้ำ ผลการขัดขวางก็อาจลดลงจนไม่อาจเอาชนะแรงวันเดอร์วาลได้

ในการบำบัดน้ำบางอย่าง ปฏิกริยากายภาพเคมี หรือ ทางเคมี เกิดขึ้นได้ในการสัมผัสกับเม็ดทรายกรอง ตัวอย่างอันหนึ่งได้แก่ การที่มีแคลเซี่ยมคาร์บอเนตตกตะกอนออกจากน้ำที่มีความอิ่มตัว (saturation index) ของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นบวก อีกกรณีหนึ่งได้แก่ การเกิดออกซิเดชั่น และการตกตะกอนของสารประกอบของเหล็ก และแมงกานีส หลังจากเกิดปฏิกริยาดังกล่าวแล้ว เม็ดทรายกรองซึ่งถูกเคลือบจะมีผิวซึ่งไวต่อปฏิกริยา ทำให้เกิดปฏิกริยา -



Schematic diagram illustrating straining, flocculation, and sedimentation actions in a rapid sand filter.

ภาพที่ 2-2 กลไกของการกรองน้ำในเครื่องกรองแบบทรายกรองเร็ว

ต่อเนื่องกันไปได้ แต่ในน้อยกรณี อาจเกิดการออกซิเดชั่น ของแอมโมเนียไปเป็นไนเตรต หรือปฏิกริยาทางชีวเคมีอื่นๆ เกิดขึ้นในระหว่างการผ่านน้ำเข้าสู่เครื่องกรองเร็วได้ ทั้งนี้ เนื่องจากมีบักเตรีเกิดขึ้นอยู่ในชั้นกรอง นั่นเอง.

แอลจีมีค่าศักยภาพซีตา(Zeta potential)อยู่ในช่วงระหว่าง -7.5 จนถึง +11.0 มิลลิโวลท์ ที่ค่าพีเอช 7.0 [28] นอกจากนี้ Langlier & Ludwig [38] (1949) ยังกล่าวกันว่า แอลจีมีประจุที่ผิว ในระหว่างพีเอช 2.5 - 11.5 แอลจีมีประจุลบ แม้ว่าจะมีค่าใกล้ศูนย์ เมื่อพีเอช 7-8 [14] กลไกในการที่แอลจีกระทบเข้ากับเม็ดกรองในการกรองนั้น เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างผิว (Surface interaction) ของอนุภาคและเม็ดทราย ซึ่งควบคุมได้โดยทางเคมี พีเอชมีความสำคัญมากในการควบคุมการกำจัดแอลจี Foess และ Borchardt พบว่า ประสิทธิภาพจะดีขึ้นเมื่อลดแรงผลักกันของแอลจี และทราย โดยเคลือบทรายด้วยวัตถุประจุบวก ในขณะที่พีเอชลดลง.

การกำจัดแอลจีโดยทรายกรองธรรมดา ที่มหาวิทยาลัยมิชิแกน โดย Borchardt และ O'Melia [5] สรุปได้ว่า.

1) ประสิทธิภาพของการกรองแอลจีแขวนลอย ตลอดทรายกรอง ลดลงตามเวลาที่ผ่านไปจนถึงค่าคงที่ที่น้อยที่สุดค่าหนึ่ง.

2) ขนาดทรายมีผลต่อ การกำจัด.

3) ไม่มีความแตกต่างในการกำจัดที่อัตราการกรอง 2.0,1.0 และ 0.2 แกลลอนต่อนาที/ตร.ฟุต.

4) การกำจัดแอลจีด้วยวิธี iron coagulation ได้ผลสูงสุด.

5) จะมีแอลจีเหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจำนวนหนึ่งเสมอ.

ที่อัตราการกรอง 2 แกลลอนต่อนาที/ตร.ฟุต [5] มีแอลจี 149,100 หน่วย/ลบ.คม. สามารถกำจัดได้เพียง 45 % หลังจากทำงานไป 12 ชม. ฟล็อคทั่วไปถูกกำจัดที่ชั้นบนของทราย-กรอง.

การดูดหรือจับอนุภาคติดผิวสารกรองเป็นกลไกสำคัญที่สุดในการกำหนดประสิทธิภาพของการกรอง กลไกนี้มีความสำคัญที่สุดจนกลไกอื่นแทบไม่มีบทบาทเลย แต่สำหรับระบบประปาที่มีการกรองน้ำแบบโดยตรง (direct filtration) ซึ่งไม่มีขบวนการโคแอกกูเลชั่น และตกตะกอนก่อนหน้าการกรอง การรวมตัวของอนุภาคความขุ่นอาจเกิดขึ้นได้ภายในชั้นกรอง และมี

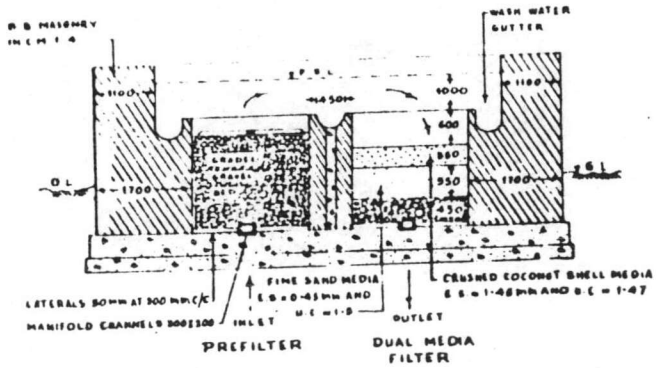
การตกตะกอนเกิดขึ้นด้วย ในกรณีหลังนี้กลไกแบบโคแอกกูเลชั่น และตกตะกอนจะมีบทบาทที่เด่นชัดขึ้นในขบวนการกรองน้ำ แต่อย่างไรก็ดี ยังเชื่อว่ากลไกแบบติดผิวก็ยังมีความสำคัญมากกว่าอยู่นั่นเอง

การกรองโดยตรงที่ไม่ใช้สารเคมีแบบหลังนี้ จำเป็นต้องให้แน่ใจว่า คุณภาพของน้ำไม่แปรปรวน และต้องไม่ขุ่นจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วจะเกิดปัญหาอุดตันเร็ว และได้น้ำที่มีคุณภาพเลว อัตราการกรองอาจสูงได้ตั้งแต่ 4–25 เมตร/ชม. (1.6–10.2 แกลลอน/ตร.ฟุต–นาที)

อัตราการกรองขึ้นอยู่กับความขุ่นในน้ำดิบ และคุณภาพน้ำที่ต้องการ โดยปกติการกรองเพื่อผลิตน้ำประปามักใช้อัตราประมาณ 4–10 เมตร/ชม. (1.6–4 แกลลอน/ตร.ฟุต–นาที)

2.8 พรีฟิลเตอร์

ในปี ค.ศ. 1920 ที่เมือง ฮุสตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา (19) มีผลรายงานว่าเครื่องกรองเร็ว สามารถกำจัดแอลจีจากน้ำที่ถูกเก็บกักไว้ได้เกือบทั้งหมด ผลดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาขบวนการกรองสองชั้น (double filtration) ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในแง่ของการลงทุน และค่าปฏิบัติการด้วย เราสามารถทำความสะอาดพรีฟิลเตอร์ได้ง่ายกว่าเครื่องกรองเร็วธรรมดามาก



ภาพที่ 2–3 ระบบพรีฟิลเตอร์ที่ Ramtek ประเทศอินเดีย (31)

และเมื่อควบคุมให้ถูกต้องแล้ว จะช่วยยืดอายุการกรองของเครื่องกรองเร็วได้อย่างมาก

ที่ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ใช้พรีฟิลเตอร์ 95 ชุด กรองน้ำประมาณ 300 ล้านแกลลอน/วัน ก่อนจะผ่านน้ำไปสู่เครื่องกรองทรายช้า โดยไม่ต้องใช้สารโคแอกกูแลนท์ (19)

ในเครื่องพรีฟิลเตอร์ซึ่งควบคุมได้เป็นอย่างดี สามารถกำจัดไดอะตอม ได้โดยประมาณดังนี้คือ. Asterionella 90 % หรือมากกว่า 85% หรือมากกว่าสำหรับ Synedra และ 75 % สำหรับ Cyclotella เมื่อวิธีการล้างเครื่องไม่ดีนัก การกำจัดไดอะตอมอาจลดลงเหลือเพียง 50 %. (19)

สำหรับพรีฟิลเตอร์ซึ่งติดตั้งที่เมืองซูริค ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือ สามารถแก้ปัญหาเครื่องกรองทรายช้ามีอายุการกรองที่ลดลง อันสืบเนื่องมาจากในทะเลสาป มี Oscillatoria เติบโตเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก.(19)

สำหรับจุลชีพบางชนิด เครื่องพรีฟิลเตอร์ หรือเครื่องกรองหยาบ(coarse filters) ก็ไม่สามารถกักไว้ได้ Boucher (19) พบว่าในจำนวนดังกล่าวก็ได้แก่ Anabaena และ Tribonema การทำโคแอกกูเลชั้นอาจนำมาร่วมในการปรับปรุงการกำจัดแอลจีของพรีฟิลเตอร์ ดังที่เคยใช้มาในเกรทยาร์เมาท์ประเทศอังกฤษ(Great Yarmouth, England) ซึ่งเกิดการอุดตันเครื่องพรีฟิลเตอร์ ในขณะกรองน้ำจากแม่น้ำที่มี Melosira

Jaksirinont(1972)(29)ได้สรุปว่า การใช้กาบมะพร้าวเป็นตัวกลางในพรีฟิลเตอร์ที่ความลึก 40–80ซม. และ burnt rice husk ที่ความลึก 40–60 ซม. เป็นตัวกลาง ในเครื่องกรองชุดถัดมา โดยมีอัตราการกรอง 1.25 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นดีที่สุด.

Low (1973)(33)ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสรุปได้ว่า พรีฟิลเตอร์มีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องกรองที่มีสารกรองสองชั้น(dual media)เมื่อใช้แหล่งน้ำดิบเดียวกัน.

Fan (1974)(12)ได้ทดลองใช้เสื่อกาบมะพร้าว(coconut husk mat)เป็นตัวกลางในการกรองน้ำโดยพรีฟิลเตอร์ พบว่า ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว มีค่าลดลง แต่ค่าของแข็งทั้งหมด,ค่านำไฟฟ้า,คลอไรด์,ความเป็นด่าง,ความกระด้าง,มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก.

Thanh และOuano (55)รายงานว่า พรีฟิลเตอร์แบบน้ำไหลตามแนวระนาบ(horizontal flow prefilter) ลดความขุ่นได้ 60–70 % แต่ไม่สามารถลดค่าความกระด้าง และความเป็นด่างของน้ำลงไปได้และจำเป็นต้องปิดถังทั้งพรีฟิลเตอร์ และ ถังกรองเร็ว ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงแมลง หรือ

สัตว์อื่นๆ ซึ่งอาจตกลงไป และทำให้เกิดภาวะลัดวงจรได้(short circuit)ในที่ที่มีปัญหาน้ำดิบมีความขุ่น และแอลจีสูง สามารถใช้พรีฟิลเตอร์แบบใช้กาบมะพร้าว,กรวด,หินปูน ได้ผล ก่อนจะผ่านน้ำเข้าสู่เครื่องกรองอัตราต่ำ และข้อดีของพรีฟิลเตอร์ที่มีการไหลเป็นไปตามแนวระนาบ ก็คือ จะเกิดทั้งการกรอง และการตกตะกอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วงไปพร้อมๆกัน เป็นการลดสารแขวนลอยลงไปได้ด้วย.

นอกจากนี้ Thanh (49) (1976) ยังศึกษาการใช้พรีฟิลเตอร์แบบใช้กาบมะพร้าว ต่อเข้ากับถังกรองแบบใช้ burnt-rice husk ชุดหนึ่ง และต่อเข้ากับถังกรองทราย อีก 1 ชุด โดยมีอัตราการกรอง 1.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. น้ำดิบมีความขุ่น 25-45 JTU น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นเหลือ 12 JTU โดยสามารถขจัดความขุ่นได้ประมาณ 63 % ในการกรอง48วันแรก พบว่า การกำจัดความขุ่นไม่ขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำดิบ แต่ครั้นนานๆไป เมื่อมีการอุดตัน การกำจัดเริ่มไม่คงตัว และขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าเครื่องพรีฟิลเตอร์.

Sevilia (50) (1971) ได้แสดงว่าการกรองด้วยสารกรองหยาบ สามารถช่วยลดความขุ่นได้มากกว่า 90% การทดลองใช้กรวดขนาด $\frac{3}{8}$ - $\frac{3}{16}$ นิ้ว (4.8 - 9.6 มม.) ด้วยอัตราการกรอง 0.25 - 2.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. โดยน้ำดิบมีค่าความขุ่นระหว่าง 100 - 300 JTU ประสิทธิภาพการลดความขุ่น 31 - 60 % ช่วงเวลาการกรองนาน 71 ชม. และที่ความขุ่น 1,200 - 1,600 JTU ช่วงเวลาในการกรองประมาณ 14 ชม. เขาได้สรุปว่า ในอัตราการกรองต่ำประมาณ 0.25 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และค่าความขุ่นต่ำๆ จะสามารถลดความขุ่นได้ถึง 90 % และอายุการกรองนานกว่า 24 ชม.

จัดได้ว่าการใช้สารกรองเป็นวัสดุที่หาได้จากท้องถิ่น ได้ริเริ่มเป็นผลสำเร็จในประเทศไทย (13) Frankel และSevilia (17) (1972) ได้ทดลองใช้ burnt rice husk และ coconut husk fiber--เป็นสารกรองสำหรับพรีฟิลเตอร์ได้ผลสำหรับการกำจัดความขุ่น และทดลองในภาคสนามได้เป็นผลสำเร็จ โดยการใช้เศษหม้อดินเผา เป็นสารกรอง.(16)

ได้มีการทดลองใช้สารกรองเป็นพลาสติคประเภทโพลีไวนิล คลอไรด์ หรือ พีวีซี (PVC) (11) ซึ่งผลิตโดยขบวนการแบบ suspension process พบว่าสารกรองขนาด 16-40 mesh มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลองสารกรองปริมาณ 1 ลบ.ม. สามารถกรองน้ำแม่น้ำที่ผ่านการทำฟล็อคคูเลชั่น และเติมคลอรีน ได้ในอัตรา 15-16แกลลอนต่อนาที/ตร.ฟุต. โดยน้ำออกมีความขุ่น 0.2 พีพีเอ็ม หลังจากกรองได้ 6รอบ(cycles)ซึ่งเมื่อใช้ทรายเปรียบเทียบ

จะต้องใช้ถึง 230 passes จึงจะได้น้ำที่ความขุ่น 0.2 พีพีเอ็ม ทำให้เห็นว่าสารกรองพลาสติค สามารถรับอัตราการกรองได้สูงกว่า สำหรับสารกรองพลาสติคนี้ อาจเป็นเทอร์โมเซ็ทติง - (thermosetting)หรือเทอร์โมพลาสติค (thermoplastic) ก็ได้.

นอกจากนี้ ยังมีการทดลองใช้พลาสติคแบบโพลียูรีเทน(polyurethane) , โพลีเอทีลีน (polyethylene), เทฟลอน(teflon)[53]เป็นสารกรองรูปร่างต่างๆกัน โดยอาจเป็นหลอด (tubes),แผ่นรูพรุน(rigid porous plate),แผ่นแบนๆฯ โดยมีขนาดหนาบางต่างๆ ไปตามต้องการ ขนาดรู อาจมีตั้งแต่ 1 ไมครอน จนถึงขนาดรูใหญ่มากๆ.

ได้มีการทดลองใช้ลูกบอลล์พลาสติคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มม. ความพรุน 0.33 เป็นสารกรองในพรีฟิลเตอร์โดย Indriani และ Harja[27] ซึ่งจากการทดลองสามารถลดค่าความขุ่นได้ 30-60 % โดยประมาณ ข้อเสียของสารกรองนี้คือบรรจุในถังยาก เนื่องจากมีค่า ถ.พ.ต่ำกว่าของน้ำ (ถ.พ. =0.26) ข้อดีก็คือ ไม่มีการสูญเสียหัวความดัน (head loss) การทดลองพบว่า เมื่อใช้พรีฟิลเตอร์นานขึ้นจะยิ่งมีผลดี นั่นคือ ผลการทำงานดีขึ้น.

สำหรับประเทศอินเดีย ก็ได้มีการทดลองใช้พรีฟิลเตอร์ โดยเรียกว่า Intermediate และ Series Filtration, Patwardhan (1975)[13] ได้ใช้เครื่องกรองมาตรฐานหลายขนาดสำหรับความขุ่นต่างๆ และ NEERI แนะให้ใช้เครื่องกรองหยาบ(roughing filter)โดยมีอัตรากรองสูงมาก และใช้กับเครื่องกรองทรายช้า หรือ upflow filter (Arceivala)[13] สำหรับ Agarwal และ Agrawal(1975) ก็ได้ทำ alum dosing กับพรีฟิลเตอร์ด้วย.

ในระบบประปาที่ Ramtek[31] ประเทศอินเดีย สำหรับน้ำความขุ่นต่ำ คือ น้ำดิบมีความขุ่นโดยเฉลี่ย 10-20 JTU ได้ใช้วิธีเติมสารส้มในถังผสม แล้วจึงนำน้ำเข้าสู่ถังพรีฟิลเตอร์ ซึ่งมีขนาด 2.0 ม.x 3.5 ม. x ระดับน้ำลึก 3 เมตร ใช้กรวดขนาด 10-50 มม. เป็นสารกรองชั้นกรองสูง 1.7 เมตร น้ำไหลขึ้นบน และมีอัตราน้ำล้น 6.75 ม./ชม. ชั้นกรองกรวดทำหน้าที่เสมือนถังกวนช้า โดยมีฟล็อคเกิดได้ตลอดเวลา และเมื่อไหลขึ้นถึงผิวกรวดบนสุด ก็จะตกลงบนผิวบน เนื่องจากความเร็วลดลงอย่างกระทันหัน ทำให้สลัดจ์สามารถไหลไปทางท่อน้ำออกที่ติดอยู่ในระดับเดียวกับชั้นบนสุดของชั้นกรวดได้ ส่วนสลัดจ์ที่ตกลงสู่ก้นถังก็สามารถถ่ายได้ทางระบบระบายสลัดจ์ที่อยู่ก้นถัง น้ำที่ออกจากพรีฟิลเตอร์มีความขุ่นไม่เกิน 20 JTUแม้ว่าน้ำดิบในบางครั้ง จะสูงถึง 300-500 หรือ 1,000 JTU ในบางครั้งบ้างก็ตาม จากถังแรกดังกล่าว น้ำที่ออกจากชั้นบนสุด

ของกรวด ก็จะไหลไปสู่ถังกรอง 2 ชั้น โดยชั้นบนใช้กะลามะพร้าวขนาด 1-2มม.สูง 35ซม. จากชั้นทรายกรองซึ่งมี effective size 0.45มม.และ uniformity coefficient 1.5 ชั้นทรายกรองลึก 55 ซม. จากการใช้งานตลอดเวลา 6 ปี ปรากฏว่า ไม่มีปัญหาเรื่องกะลามะพร้าวหมดสภาพการใช้งาน แม้ว่าโดยธรรมชาติ จะเป็นสารอินทรีย์ก็ตาม.

2.9 การใช้พรีฟิลเตอร์กับเครื่องทรายกรองช้า

เราอาจใช้เครื่องทรายกรองช้าเพียงอย่างเดียวในการกรอง หรืออาจจะให้น้ำไหลผ่าน เครื่องกรองเร็ว แบบใช้แรงโน้มถ่วง(พรีฟิลเตอร์)โดยไม่ได้ใช้สารโคแอกกูแลนท์หรือเครื่องตะแกรงละเอียด การใช้เครื่องพรีฟิลเตอร์ก็เพื่อทุ่นภาระของเครื่องทรายกรองช้า และทำให้ช่วงการล้างนานขึ้น หรือทำให้อัตราการกรองเร็วขึ้น หรือทำให้เกิดขึ้นทั้งสองอย่าง[22] ข้อสรุปของผลงานของพรีฟิลเตอร์รวบรวมไว้โดย Ridley[56] ซึ่งได้เปรียบเทียบผลงานของสถานี ของการประปานครลอนดอน 3 แห่ง ด้วยกัน ได้แก่ ที่ถนนแฮนเวิร์ธ(Hanworth Road)ซึ่งมีแต่เครื่องกรองทรายช้า,ส่วนสาธารณะเคมพ์ตัน(Kempton Park)ซึ่งมีเครื่องพรีฟิลเตอร์ ก่อนเครื่องกรองทรายช้า และ ศูนย์รวมแอชฟอร์ด(Ashford Common) มีเครื่องตะแกรงละเอียดก่อนเครื่องทรายกรองช้า ตารางต่อไปนี้ จะแสดงผลในช่วงเวลาของวันที่ 1 เมษายน - 30 กันยายน ตลอดเวลา 5 ปี จากปี ค.ศ. 1959 - 1963 โดยช่วงเวลาในเดือนดังกล่าวจะมีแอลจีเติบโตมากที่สุด.

ตารางที่ 3

ผลการทำงานของเครื่องทรายกรองช้า ณ สถานีการประปานครหลวงแห่งอังกฤษ

(ฤดูร้อน ปี ค.ศ. 1959-1963)

สถานีและชนิดของพรีฟิลเตอร์ที่ใช้	อัตราการกรอง (ม./ชม.)	ปริมาณน้ำที่กรองต่อพื้นที่เฮคแตร์ของชั้นทรายที่ถูกทำความสะอาด(MI/ha*)
ถนนแฮนเวิร์ธ(ไม่มีพรีฟิลเตอร์)	0.004-0.059	315-705
ส่วนเคมพ์ตัน(เครื่องพรีฟิลเตอร์)	0.132-0.152	1,260-1,600
ศูนย์แอชฟอร์ด(เครื่องตะแกรงละเอียด)	0.132-0.137	1,000-1,570

หมายเหตุ * 1 MI = 10^3 M^3 (ลบ.ม.)

1 ha = 10^4 ตร.ม.

ดังนั้น 1 MI/ha = 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.

I 17950314

ในช่วงดังกล่าวนี้ ที่สวนเดมพ์ตัน ใช้น้ำในการล้างฟรีฟิลเตอร์ 1.15 – 1.62 % ของน้ำที่กรองได้ ในขณะที่แอชฟอร์ดใช้ 1.64 – 2.03 % ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการล้าง เครื่องกรองทรายช้าที่เพิ่มมากขึ้น เงินลงทุน และปฏิบัติการของฟรีฟิลเตอร์ นับเป็น ผลดีทางด้านการประหยัด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่จะกรองได้มากขึ้น 2.5 – 4 เท่า ของระบบที่ไม่ใช้ฟรีฟิลเตอร์.

2.10 องค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เป้าหมายของการกรองก็เพื่อให้ได้น้ำที่มีความขุ่นต่ำที่สุด หรือน้ำใสที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่อไปนี้ คือ

1.) ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ ลักษณะของน้ำที่เข้ากรองซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรอง คือ อุณหภูมิ และความง่ายในการกรอง (filterability) แต่อุณหภูมิของน้ำไม่จำเป็นต้องควบคุม แม้ว่าน้ำเย็นจะกรองได้ยากกว่าน้ำอุ่นก็ตาม แต่ filterability เป็นลักษณะสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งก็สัมพันธ์กับขนาด, ความเข้มข้น และลักษณะยึดติด(adhesive gualities) ของสารแขวนลอยในน้ำ เช่น Heiple[22] สรุปจากการทดลองว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น เป็นสัดส่วนผกผันกับความขุ่นของน้ำดิบ Hansen และ Yao ได้ระบุว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อความขุ่นของน้ำดิบเพิ่มขึ้น เหตุผลก็คือ อาจเกิดการฟล็อคคูเลชั่น ได้ดีกว่าและการรวมอนุภาคเข้าด้วยกัน ก่อนการตกตะกอน ได้ดีขึ้น Sivakumar[52] ได้ทดลองกับเครื่องกรองแบบไหลตามแนวระนาบ (horizontal flow filter) โดยใช้หินปูนเป็นสารกรอง สามารถลดความขุ่นได้ 85% สำหรับน้ำดิบความขุ่นสูง (150 JTU) และสำหรับความขุ่นต่ำ (35 JTU) สามารถกำจัดได้ 72% Ives[28] สรุปว่า ขนาดของอนุภาคในน้ำจะมีอิทธิพลในการคงอยู่ของอนุภาคบนผิวของสารกรอง ซึ่งอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการกรองดีขึ้น

2.) ลักษณะของสารกรอง ลักษณะของสารกรองทางกายภาพมีผลโดยตรงต่อการทำงานของเครื่องกรอง Heiple[22] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสารกรองหยาบสำหรับการกรองตามแนวดิ่ง เขาสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของเครื่องกรองในเทอมการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดสารกรองลดลง Kerrigan และ Polkowski[30] ค้นพบว่าสารกรองพลาสติคฟรีฟิลเตอร์ของชั้นกรอง 2 ชั้น (2 layer filter bed) กับทราย กำจัดสารแขวนลอยจากน้ำดิบ ได้โดยไม่ทำให้เกิดสูญเสียหัวความดันสูง ๆ

ที่สำคัญอีกอย่าง คือ ความพรุนของสารกรอง โดยทั่วไป ความพรุนมากจะลดประสิทธิ-ภาพของการกำจัดความขุ่น

3.) การปฏิบัติการ องค์ประกอบการทำงานได้แก่ อัตราการไหล, ความลึก หรือ ความ-ยาวของชั้นกรอง และ available head Baylis[3] ได้พบว่าที่อัตราการกรองสูง ๆ น้ำที่ออกจากเครื่องกรองจะสูงกว่าที่อัตราการกรองต่ำ ๆ เนื่องด้วยมีการแทรกตัวของอนุภาคที่รวมตัวกันได้ลึกกว่านั่นเอง Hudson Jr.[25] รายงานว่าที่อัตราการกรองสูงขึ้นเท่าไรก็ยิ่งทำให้ระยะเวลาการใช้เครื่องกรองสั้นลง และในช่วงวิกฤติ ก็จะยิ่งมีน้ำออกจากเครื่องกรองที่มีคุณภาพด้อยลงด้วย Segall และ Okun[27] สรุปว่าผลของอัตราการกรองต่อคุณภาพน้ำ เป็นฟังก์ชั่นกับขนาด และความพรุนของสารกรอง ด้วย Jaksirinont[29] ได้ทดลองระบบการกรองสองครั้ง โดยใช้ใยมะพร้าวเป็นสารกรองชั้นต้น ตามด้วย burnt rice husk สรุปได้ว่า อัตราการกรองสำหรับคุณภาพน้ำที่ดีที่สุด คือ 1.25 $ม^3/ม^2$-ชม. ที่ความลึกของชั้นกรองคงที่ Sivakumar[52] ศึกษาเครื่องกรองตามแนวราบ (horizontal filter) ใช้หินปูนเป็นสารกรอง สรุปได้ว่าอัตราการกรองที่เหมาะสมในเทอมประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ย คือ 0.34 $ม^3/ม^2$-ชม. สำหรับความขุ่นต่ำ (35 JTU) และ 0.19 $ม^3/ม^2$-ชม. ที่ความขุ่นสูง (150 JTU)