



การปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 2

## กระบวนการดูดซับ

ปราโมช เชื้อชาณ

**กระบวนการดูดซับ (Adsorption)** เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical treatment) ที่พบได้บ่อยในโรงงานอุตสาหกรรม/สถานประกอบการกิจการต่างๆ บทความนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดพอสังเขปของกระบวนการดูดซับ



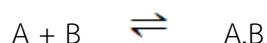
### วัตถุประสงค์ของกระบวนการ

**วัตถุประสงค์หลัก**ของกระบวนการดูดซับที่นำมาใช้ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำคือ การกำจัดสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น สี และรสในน้ำ กำจัดคลอรีน ยาฆ่าแมลงและยาปรับสีที่ขุ่นขม สารไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งช่วยกำจัดสารประกอบอินทรีย์บางชนิดซึ่งหากได้รับในระยะยาวอาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane) เป็นต้น



### หลักการ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ และบริเวณถ่ายโอนมวลสาร

**หลักการของกระบวนการดูดซับ** คือการเคลื่อนย้ายมวลสาร (mass transfer) ซึ่งเกิดจากการที่สารที่อยู่ในของเหลวถูกเคลื่อนย้ายมาสะสมหรือเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็ง ทำให้สามารถกำจัดสารนั้นออกจากของเหลวได้ โมเลกุลของสารต่างๆซึ่งมาสะสมหรือถูกดูดซับติดที่พื้นผิวถูกเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) และเรียกของแข็งที่ทำการดูดซับว่า สารดูดซับ (adsorbent) โดยมีขั้นตอนของการดูดซับ 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การเคลื่อนย้ายเชิงมหภาค (macrotransport) เป็นการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับผ่านน้ำเข้าสู่พื้นผิวของสารดูดซับ การเคลื่อนย้ายเชิงจุลภาค (microtransport) เป็นการแพร่กระจายของสารถูกดูดซับเข้าหาช่องว่างภายในของพื้นที่ผิวสารดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยคือ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (film diffusion) และการแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรง (pore diffusion) และการดูดซับ (adsorption) เป็นการเกาะยึดติดกันระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจอาศัยทั้งแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเขียนปฏิกิริยาเคมีง่ายๆ ดังนี้



โดยที่ A หมายถึงสารถูกดูดซับ และ B หมายถึงสารดูดซับ และ A.B หมายถึงสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินการต่อไปจนกระทั่ง เข้าสู่สภาวะคงที่ (equilibrium state) คืออัตราการดูดซับ (rate of adsorption)

เท่ากับอัตราการคายสารออก (rate of desorption) แล้ว จะเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ซึ่ง ณ จุดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ จากหลักการของกระบวนการดูดซับนี้ทำให้ต้องมีความรู้เกี่ยวกับไอโซเทอร์มของการดูดซับ และบริเวณถ่ายโอนมวลสาร

**ไอโซเทอร์มของการดูดซับ** (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุล การดูดซับ ระหว่างปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับติดสารดูดซับต่อมวลของสารดูดซับ กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือน้อยในสารละลาย(น้ำ) ที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนเป็นกราฟจะได้เส้นแนวโน้มที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถหาได้ด้วยการทำการทดลอง โดยใช้ สารละลาย(น้ำ)ที่ทราบค่าหรือปริมาณของสารถูกดูดซับที่ต้องการกำจัดในปริมาตรที่คงที่ และทำการแปรเปลี่ยนปริมาณของสารดูดซับ และกำหนดระยะเวลาที่สัมผัส จากนั้นจึงทำการหาค่าหรือปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลือน้อยในน้ำที่ผ่านการทดลอง สามารถคำนวณหาค่าขีดความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ได้ดังสมการ

$$q_e = (X/m) = V(C_o - C_e) / m$$

โดยที่  $q_e$  = ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) หรือ ปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ (X)ต่อมวลของสารดูดซับ (m) ที่สภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับต่อกรัมของสารดูด

$C_o$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย(น้ำ) หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือน้อยในสารละลาย(น้ำ) ที่สภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

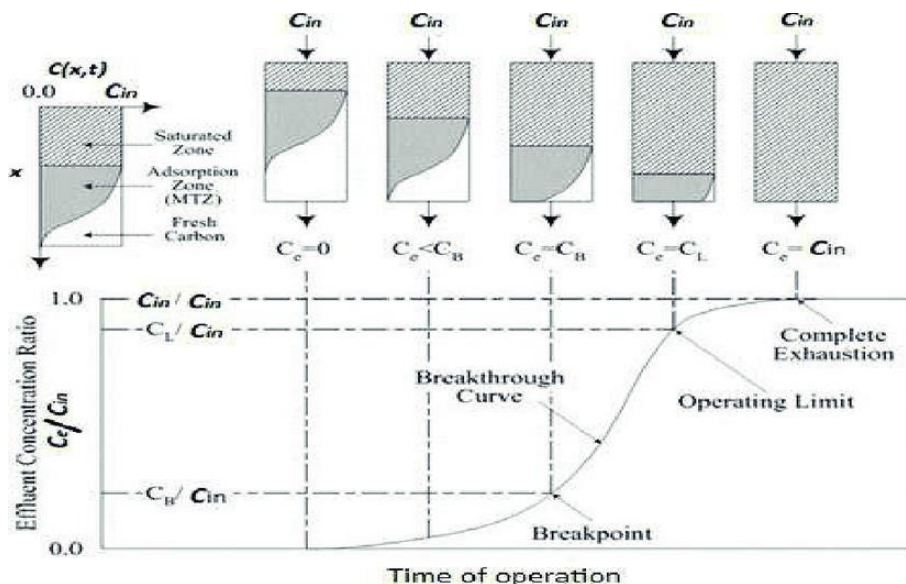
V = ปริมาตรของสารละลาย(น้ำ)ที่มีสารถูกดูดซับอยู่ หน่วยเป็น ลิตร

m = มวลของสารดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็น กรัม

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) ได้ถูกพัฒนาขึ้นหลายไอโซเทอร์ม ภายใต้สมมุติฐานต่าง ๆ เช่น Langmuir Isotherm , Freundlich Isotherm , Brunauer ,Emmet and Teller Isotherm (BET Isotherm) เป็นต้น

**บริเวณถ่ายโอนมวลสาร** (mass transfer zone ; MTZ) เป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการดูดซับในชั้นของสารดูดซับ (bed)โดยค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปถึงจุดอิ่มตัว(saturated) ในกรณีที่บรรจุสารดูดซับในคอลัมน์ปิดแบบชั้นสารดูดซับอยู่กับที่ ( fixed bed) การเกิดบริเวณถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นดังภาพที่ 1 เมื่อน้ำที่มีสารถูกดูดซับไหลเข้าสู่คอลัมน์ของสารดูดซับด้านบนและถูกสารดูดซับดูดซับเอาไว้ทำให้น้ำที่สะอาดไหลออกจากคอลัมน์ทางด้านล่าง จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้นบริเวณถ่ายโอนมวลสาร จะเริ่มจากด้านบนของชั้นของสารดูดซับ เมื่อชั้นบนของสารดูดซับถึงจุดอิ่มตัว บริเวณถ่ายโอนมวลสารจะเคลื่อนที่ลงมาตามทิศทางของไหลของน้ำ จนถึงจุดหนึ่งจะเริ่มมีสารถูกดูดซับหลุดออกจากชั้นของสารดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ออกจากระบบต่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเริ่มต้น กับปริมาตรของน้ำหรือเวลาเดินระบบ เรียกว่า กราฟเบรคทรู

(breakthrough curve) ที่ช่วงเบรคทรูนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ทางออกจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเท่ากับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับทางเข้า จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นสารดูดซับมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับจะมีประสิทธิภาพต่อเมื่อความหนาของชั้นสารดูดซับมากกว่าความหนาของบริเวณถ่ายโอนมวลสาร



ภาพที่ 1 กราฟเบรคทรู และบริเวณถ่ายโอนมวลสาร

ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/1-Mass-Transfer-Zone-Movement-and-the-Corresponding-Breakthrough-Curve-from-Pure-Water\\_fig1\\_320880241](https://www.researchgate.net/figure/1-Mass-Transfer-Zone-Movement-and-the-Corresponding-Breakthrough-Curve-from-Pure-Water_fig1_320880241)



## อุปกรณ์ของกระบวนการ

อุปกรณ์/วัสดุที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ สารดูดซับ (absorbent) โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อสารดูดซับมีพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะติดได้จำนวนมาก สารดูดซับมีอยู่หลายชนิด เช่น อะลูมินา กัมมันต์ (activated alumina) สารสังเคราะห์โพลิเมอร์ หรือ เรซิน (synthetic polymers or resins) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในการปรับปรุงคุณภาพน้ำคือ ถ่านกัมมันต์ ในที่นี้จึงกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถทำมาจากวัสดุหลากหลายชนิด เช่น ไม้ ถ่านหิน กะลามะพร้าว เป็นต้น แต่ที่นำมาใช้ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ส่วนใหญ่จะทำมาจากถ่านหินปิทิวินัสหรือลิกไนท์ ถ่านหินนี้จะถูกเผาอย่างช้าๆ ในเตาเผาไร้ออกซิเจน ดังนั้นมันจึงไม่ไหม้หมดและสามารถเปลี่ยนสภาพจากถ่านหินมาเป็นคาร์บอน ต่อจากนั้นจะถูกกระตุ้นโดยให้สัมผัสผสมกับไอน้ำ ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเป็นโพรงหรือช่องว่างจำนวนมาก ดังภาพที่ 2 ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะถูกบด และทำการร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

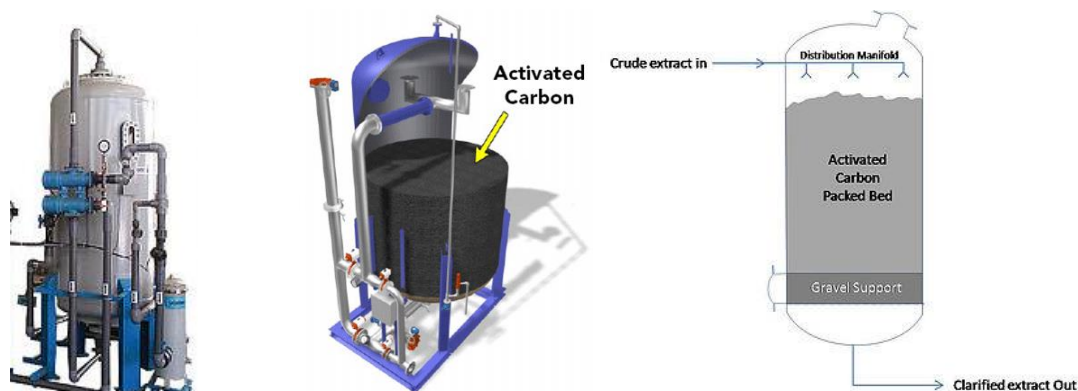


ภาพที่ 2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ที่มา: <https://www.elgalabwater.com/technologies/activated-carbon>

<http://www.atl-activatedcarbon.com/view.asp?nid=576>

ถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีอยู่ 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ผง (powdered activated carbon; PAC) และถ่านกัมมันต์เม็ดหรือเกล็ด (granular activated carbon : GAC) ดังนั้นรูปแบบการใช้งานจึงสามารถใช้ทั้งในแบบผง และแบบเม็ด อย่างไรก็ตามในโรงงานอุตสาหกรรมมักพบกับการใช้แบบเม็ดมากกว่า โดยใช้เมื่อต้องการกำจัดสารอินทรีย์แบบต่อเนื่อง ในการใช้งานอาจใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดเปรียบเหมือนชั้นกรองในกระบวนการกรอง ซึ่งสามารถใช้ได้หลายรูปแบบ คืออาจใช้แทนสารกรองบางส่วนหรือใช้แทนสารกรองทั้งหมด ดังนั้นแรงขับน้ำที่ใช้จึงอาจเป็นแรงโน้มถ่วงของโลกหรือใช้แรงดันก็ได้ อย่างไรก็ตามที่พบได้บ่อยในโรงงานอุตสาหกรรมคือแบบบรรจุถ่านกัมมันต์แบบเม็ดเป็นชั้นอยู่กับที่ (fixed bed) ในถังภายใต้แรงดัน ที่เรียกว่า ถังถ่านกัมมันต์ (activated carbon contractors) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ถังถ่านกัมมันต์ (activated carbon contractors)

ที่มา: <https://www.steviashantanu.com/new-activated-carbon-treatment-methods>

ถังถ่านกัมมันต์ดูจากลักษณะภายนอกคล้ายกับเครื่องกรองทรายภายใต้แรงดันมาก แต่ภายในมีความแตกต่างคือบรรจุถ่านกัมมันต์แบบเม็ดแทนทราย ส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของถังถ่านกัมมันต์นี้คล้ายกับเครื่องกรองทรายภายใต้แรงดัน คือน้ำจะไหลจากบนลงล่าง(down flow) เมื่อน้ำที่มีสารถูกดูดซับอยู่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์แบบเม็ดจะเกิดกระบวนการดูดซับ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักพบการติดตั้งถังถ่านกัมมันต์อยู่หลังเครื่องกรองทรายภายใต้แรงดัน ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระบวนการดูดซับถูกรบกวนจากสารแขวนลอย นอกจากนี้มีข้อสังเกตว่า โดยทั่วไปถังถ่านกัมมันต์นี้อาจถูกเรียกว่าถังกรองถ่านหรือถังกรองคาร์บอน แต่ต้องเข้าใจว่าโดยหลักวิชาการแล้วถังนี้เป็นกระบวนการดูดซับมากกว่ากระบวนการกรอง รวมทั้งมีวัตถุประสงค์หลักในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่แตกต่างจากกระบวนการกรอง

นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด เมื่อถูกใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง โพรงหรือช่องว่างที่พื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์จะอุดตันด้วยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง ดังนั้นเมื่อใช้งาน ไปถึงระดับหนึ่งแล้วจำเป็นต้องเปลี่ยน ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดใหม่ และนำ ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ที่มี ประสิทธิภาพน้อยลงไปทำการฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ซึ่งทำได้โดยการนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง และควบคุมปริมาณออกซิเจน ความชื้นได้ การเผานี้จะทำลายสารที่ถูกดูดซับที่ผิว และทำให้ ถ่านกัมมันต์แบบ เม็ด ถูกทำลายไปประมาณ 5 – 10 เปอร์เซ็นต์ด้วย



### พารามิเตอร์เบื้องต้น

ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการดูดซับมีค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่สำคัญควรทราบ ดังนี้

#### 1) ค่าอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด(GAC usage rate) คำนวณได้จากสมการ

$$(M_{GAC} / Qt) = (C_0 - C_e) / q_e$$

โดยที่  $(M_{GAC} / Qt)$  = ค่าอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด , กรัมของGACต่อลิตร

$M_{GAC}$  = มวลของ GAC , กรัม

$Q$  = อัตราการไหล .ลิตร/ชม.

$t$  = ระยะเวลา ชม.

$C_0$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเริ่มต้น , มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับสุดท้าย , มิลลิกรัมต่อลิตร

$q_e$  = ค่าขีดความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) , มิลลิกรัมของสารที่ถูกดูดซับ ต่อกรัมของGAC

#### 2) ค่าระยะเวลาการสัมผัสของชั้นGACเปล่า (empty bed contact time ,EBCT)

คำนวณได้จากสมการ

$$EBCT = V_b / Q = (A_b L) / (V_f A_b) = L / V_f$$

โดยที่ EBCT = ค่าระยะเวลาการสัมผัสของชั้นGACเปล่า,ชม.

$V_b$  = ปริมาตรของGAC ที่บรรจุในถัง .ลบม.

$Q$  = อัตราการไหล .ลบม./ชม.

$A_b$  = พื้นที่หน้าตัดของชั้น GAC ,ตรม.

$L$  = ความหนาของชั้น GAC , ม.

$V_f$  = ความเร็วที่ผิวหน้า , ม./ชม.

#### 3) ปริมาณGAC ในชั้น (mass of GAC in bed) คำนวณได้จากสมการ

$$M_{GAC \text{ in bed}} = V_b \rho_{GAC} = EBCT \times Q \times \rho_{GAC}$$

โดยที่  $M_{GAC \text{ in bed}}$  = ปริมาณGAC ในชั้น.กรัม

$\rho_{GAC}$  = ความหนาแน่นของ GAC , กรัมต่อลิตร

$V_f$  = ความเร็วที่ผิวหน้า , ม./ชม.

4) ปริมาณน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ EBCT คำนวณได้จากสมการ

$$V_{at EBCT} = M_{Gac at EBCT} / (M_{GAC} / Q t)$$

โดยที่  $V_{at EBCT}$  = ปริมาณน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ EBCT .ลิตร

$M_{GAC}$   $M_{Gac at EBCT}$  = มวลของ GAC ที่ EBCT , กรัม

$(M_{GAC} / Q t)$  = ค่าอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด , กรัมของGACต่อลิตร

5) อายุของชั้นGAC (bed life) มีหน่วยเป็นวัน คำนวณได้จากสมการ

$$bed\ life = V_{at EBCT} / Q$$

6) ค่าปริมาณจำเพาะ (specific throughput)เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงสมรรถนะของGACเชิงปริมาณคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ค่าปริมาณจำเพาะ} = (Q t) / (M_{GAC}) = (V_b t) / (EBCT \times M_{GAC})$$

$$= (V_b t) / (EBCT \times \rho_{GAC} \times V_b) = (t) / (EBCT \times \rho_{GAC})$$

ค่าปริมาณจำเพาะมีหน่วยเป็นปริมาตรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพต่อ ปริมาณของGAC ลบ.ม./กก.

7) ค่าอัตราการใช้คาร์บอน (carbon usage rate,CUR) เป็นอีกพารามิเตอร์ที่ใช้แสดง

สมรรถนะของGACเชิงปริมาณ โดยเป็นส่วนกลับของค่าปริมาณจำเพาะ คำนวณได้จากสมการ

$$\text{ค่าอัตราการใช้คาร์บอน} = (M_{GAC}) / (Q t) = 1 / \text{specific throughput}$$

ค่าCUR มีหน่วยเป็นปริมาณของGAC ต่อปริมาตรของน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ กก /ลบ.ม.

### เอกสารอ้างอิง

American Water Works Association (2010) Water Treatment (4<sup>th</sup> ed) USA: American Water Works Association,

Davis M. L. (2011) Water and Wastewater Engineering. New York: McGraw-Hill, Inc.,

John C. Crittenden and et al., (2005) Water Treatment : Principles and Design (2<sup>nd</sup> ed) New Jersey John Wiley & Sons, Inc

Kerry J. Howe David W. Hand (2012) Principles of Water Treatment New Jersey John Wiley & Sons, Inc.

Takashi Asano and et al., (2007) Water Reuse New York: McGraw Hill, Inc.,

### ภาพประกอบจาก

[https://www.123rf.com/clipartvector/water\\_drop.html?imgtype=2&oriSearch=water&sti=o69cegnac48cfslua2&mediapopup=58658823](https://www.123rf.com/clipartvector/water_drop.html?imgtype=2&oriSearch=water&sti=o69cegnac48cfslua2&mediapopup=58658823)

[https://www.123rf.com/clipartvector/water\\_treatment\\_equipment.html?imgtype=2&oriSearch=water+treatment+equipment&sti=mjsuc7trbafqae7qeo%7C&mediapopup=59386299](https://www.123rf.com/clipartvector/water_treatment_equipment.html?imgtype=2&oriSearch=water+treatment+equipment&sti=mjsuc7trbafqae7qeo%7C&mediapopup=59386299)