บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 หลักการทั่วไป

การลดมลสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยระบบสระเติมอากาศ อาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบใช้ออกซิเจน (Aerated Action) โดยแบกทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นพลังงานในการเจริญเติบโต และสร้างเซลล์ใหม่ ดังสมการที่ 2.1.1 และ 2.1.2

$$\text{Organics} + O_2 + \text{Bacteria} \longrightarrow CO_2 + H_2O + NO_3^- + SO_4^= + \text{Energy} \quad (2.1.1)$$

$$\text{Organics} + \text{Energy} + \text{Bacteria} \longrightarrow \text{Bacteria} \quad (2.1.2)$$

ปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสมการ (2.1.1) สำหรับในสระเติมอากาศจะมีอัตราเร็วกว่าในระบบบ่อผึ่ง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีอย่างเพียงพอจนไม่เป็นตัวจำกัดของปฏิกิริยา และเนื่องจากไม่มีการควบคุมปริมาณแบกทีเรีย ดังนั้นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสระเติมอากาศจึงช้ากว่าในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ มาก

โดยที่การทำงานของสระเติมอากาศเป็นแบบไม่มีตะกอนเวียนกลับ ดังนั้นระยะเวลาที่น้ำทิ้งถูกเก็บกักอยู่ในสระเติมอากาศ (Hydraulic Retention Time, HRT) จึงเท่ากับเวลาเฉลี่ยที่แบกทีเรียถูกเก็บกักอยู่ในสระเติมอากาศ (Mean Cell Residence Time , MCRT หรือ Solids Retention Time, SRT) นั่นคือ HRT = SRT สระเติมอากาศจึงจะมีขนาดใหญ่พอที่จะเก็บกักน้ำเสียไว้ได้หลายวัน เพื่อให้ค่า HRT สูงกว่าระยะเวลาในการแบ่งเซลล์ของแบกทีเรีย (Cell Reproduction Time) มิฉะนั้นจะไม่มีแบกทีเรียในสระเติมอากาศเพียงพอแก่การลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ในกรณีเช่นนี้ประสิทธภาพการบำบัดจะต่ำมาก

เนื่องจากสระเติมอากาศมีค่า HRT หลายวัน การดำรงชีพของแบกทีเรียในสระเติมอากาศจึงอยู่ในขั้น Endogeneous Phase ปริมาณแบกทีเรียในสระเติมอากาศวัดในรูปของ MLSS จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ จึงไม่มีสลัดจ์ส่วนเกินที่ต้องระบายทิ้งยกเว้นส่วยที่ให้ไปตกตะกอนในบ่อ polishing pond

อัตราเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งของสระเติมอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมหลายประการที่สำคัญได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ธาตุอาหาร ความเข้มข้นของสาร

ละลายออกซิเจนในสระ และความยากง่ายในการย่อยสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

ระบบสระเติมอากาศ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. Aerobic Lagoons ได้แก่ สระที่มีกำลังเครื่องเติมอากาศ พอเพียงที่จะกวนน้ำในสระอย่างทั่วถึงจนไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นในสระ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในสระจะเป็นแบบใช้ออกซิเจนตลอดความลึก โดยปรกติน้ำทิ้งที่ออกจากสระบำบัดแบบนี้จะค่อนข้างขุ่นจำเป็นต้องแยกตะกอนออกโดยการตกตะกอนในถังตกตะกอน หรือบ่อตกตะกอน

ข. Facultative Aerated Lagoons ได้แก่ สระที่มีกำลังเครื่องเติมอากาศพอเพียงที่จะให้ออกซิเจนแก่แบกทีเรียตามปริมาณที่ต้องการ แต่ไม่เพียงพอที่จะกวนน้ำในสระอย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการตกตะกอนในสระ ตะกอนจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจนกลายเป็นกาซมีเธนและสารละลายอินทรีย์ ซึ่งจะถูกย่อยสลายไปพร้อมกับสารละลายอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

ในทางปฏิบัติ ระบบสระเติมอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยสระเติมอากาศหลายสระเรียงต่อกันแบบอนุกรม ในกรณีที่น้ำทิ้งมีค่า บีโอดี สูงมาก อาจจำเป็นต้องใช้สระหมัก (Anaerobic Lagoons) ลดปริมาณสารอินทรีย์บางส่วนลงเสียก่อน แล้วจึงบำบัดต่อด้วยสระเติมอากาศ โดยทั่วไปอัตราการย่อยสลายในสระเติมอากาศสองสระซึ่งต่อกันแบบอนุกรมจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่อัตราการย่อยสลายในสระแรกจะสูงกว่าในสระที่สอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายได้ถูกย่อยสลายไปในสระแรกแล้ว สารอินทรีย์ที่เข้าสู่สระที่สองจึงเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากเป็นส่วนมาก

KORMANIK (1972) TIKHE (1975) และ WHITE and RICH (1976) ได้เสนอแนะว่าการออกระบบบำบัดน้ำเสียแบบสระเติมอากาศชนิดหลายสระ ให้ออกแบบสระแรกเป็นสระแบบ Aerobic และสระหลังเป็นแบบ Facultative จะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการที่จะใช้สระแบบ Aerobic หรือสระแบบ Facultative ทั้งสองสระ

ข้อดีของระบบสระเติมอากาศ คือการควบคุมดูแลทำได้ง่าย ค่าก่อสร้างต่ำ ไม่ใช้พื้นที่มากจนเกินไป ไม่มีปัญหาการกำจัดตะกอนรับภาระบรรทุกที่มากเกินปกติได้ดีเพราะมีปริมาตรมาก ไม่มีกลิ่นเหม็นและเหตุเดือดร้อนรำคาญอย่างอื่น และประสิทธิภาพสูงพอสมควร

2.2 การออกแบบระบบ

ระบบบำบัดแบบสระเติมอากาศอาจสมมุติให้ว่ามีลักษณะเป็นแบบกวนสมบูรณ์ - (Completely Mixed) ที่ไม่มีการหมุนเวียนแบกทีเรียนำกลับมาเข้าในระบบบำบัดอีก การคำนวณจะอาศัยสมมุติฐานดัง ต่อไปนี้

ก. ปฏิกิริยาการลดมลสารอินทรีย์โดยแบกทีเรียในสระบำบัด เป็นปฏิกิริยาแบบอันดับที่ 1 (First Order Reaction) คือ อัตราการลดมลสารอินทรีย์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่ามลสารอินทรีย์ของน้ำเสียในขณะนั้น

ข. สระบำบัดเป็นแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed) คือ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen,DO) และมลสารอินทรีย์ รวมทั้งค่าอื่นๆในสระบำบัดเท่ากันทุกแห่ง

ค. ปฏิกิริยาในการบำบัดอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) กล่าวคือ

$$\frac{dc}{dt} = c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} - k.c = 0$$

กรณีเป็นปฏิกิริยาอันดับแรก

หรือ

$$\frac{dc}{dt} = c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} - k^*.x.c = 0$$

กรณีเป็นปฏิกิริยาอันดับแรกเมื่อเทียบกับ c แต่จะมีส่วนสัมพันธ์กับมวลหรือความเข้มข้นของจุลินทรีย์ด้วย

c_o = ค่ามลสารอินทรีย์ของน้ำเสียก่อนการบำบัด (เช่นวัดในรูป BOD_5),มิลลิกรัม ต่อ ลิตร

c = ค่ามลสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ออกจากสระบำบัด (เช่นวัดในรูป BOD_5),มิลลิกรัม ต่อ ลิตร

k = สัมประสิทธิ์การลดมลสารอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียชนิดสระเติมอากาศ,วัน$^{-1}$

k = $k^*.x$

k^* = สัมประสิทธิ์การลดมลสารอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียชนิดสระเติมอากาศต่อปริมาณเซลล์ของแบคทีเรีย,(มิลลิกรัมต่อลิตร.วัน)$^{-1}$

t = เวลาเก็บกัก,วัน

x = ปริมาณเซลล์ของแบคทีเรียในรูป MLSS ในถังปฏิกิริยา,มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่สภาวะคงที่

$$\frac{dc}{dt} = 0$$

$$c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} - k.c = 0$$

$$c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} = k.c$$

$$\frac{Q}{V}.(c_o - c) = k.c$$

$$c_o - c = k.c.t$$

$$\frac{c_o - c}{c} = k.t$$

$$\frac{c_o}{c} - 1 = k.t$$

$$\frac{c_o}{c} = k.t + 1$$

$$\boxed{\frac{c}{c_o} = \frac{1}{k.t + 1}}$$

$$\frac{dc}{dt} = 0$$

$$c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} - k^*.x.c = 0$$

$$c_o.\frac{Q}{V} - c.\frac{Q}{V} = k^*.x.c$$

$$\frac{Q}{V}.(c_o - c) = k^*.x.c$$

$$c_o - c = k^*.x.c.t$$

$$\frac{c_o - c}{c} = k^*.x.t$$

$$\frac{c_o}{c} - 1 = k^*.x.t$$

$$\frac{c_o}{c} = k^*.x.t+1$$

$$\boxed{\frac{c}{c_o} = \frac{1}{k^*.x.t + 1}}$$

จะเห็นได้ว่าในการคำนวณออกแบบระบบจะต้องรู้ค่า k หรือ k^* ซึ่งมีผู้วิจัยและรายงานว่าค่ามีแตกต่างกันตามแสดงในตารางที่ 2.1

Metcalf & Eddy,1988 แนะนำว่าค่า k ของน้ำเสียทั่วๆไป = 0.25 - 1.0

VISUTHIRUNNGSIURI (1976) ศึกษาระบบสระเติมอากาศของโรงงานน้ำตาลกรุงไทยซึ่งเป็นสระเติมอากาศชนิดสองสระพบว่าค่า k ของสระเติมอากาศทั้งสองสระใกล้เคียงกันประมาณ 1.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เสริมพล รัตสุข,2527 แนะนำว่าค่า k ของน้ำเสียทั่วๆไป = 0.5 - 3.0

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่า k จะมีค่าแปรผันสูงมากขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สภาพของน้ำเสีย และสภาวะแวดล้อมต่างๆ น้ำเสียที่บำบัดยากจะมีค่า *k* ต่ำ น้ำเสียที่บำบัดง่ายจะมีค่า *k* สูง และอุณหภูมิจะมีผลต่อค่า *k* ด้วย

ตารางที่ 2.1 ค่า *k* ของน้ำเสียชนิดต่างๆ (สุภาพ,2520)

ชนิดของน้ำทิ้ง	อุณหภูมิ ($^{\circ}$c)	เวลาเก็บกัก (วัน)	ประสิทธิภาพการลดบีโอดี (ร้อยละ)	*k* (วัน$^{-1}$)
Kraft	20-36	4	64	0.485
	26-39	4	81	1.018
	26-40	3	73	0.904
News chip	17-30	10	68	0.21
Sewage	20	8.6	88	0.89
	13	9.6	84	0.64
	9	7.3	73	0.39
	8	3.5	59	0.43
Paper board	26	5.7	92	2.03
	20	5.1	83	0.97
	24	3.2	80	1.26
Cannery	17.2	4.5	94	3.59
	6.3	4.5	43	0.195
	8.5	13.0	95	1.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าระบบบำบัดชนิดนี้จะต้องใช้ที่ดินค่อนข้างมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบจะถูกกำหนดโดยค่าที่ดินในการปลูกสร้าง

โดยทั่วไปการคำนวณออกแบบระบบยังอาศัยข้อมูลและตัวเลขของต่างประเทศ ซึ่งไม่แน่นักว่าจะเหมาะสมกับประเทศไทยหรือไม่ โดยที่ข้อมูลสำหรับเรื่องนี้ประเทศไทยมีน้อยมากทำให้ผลจากการคำนวณอาจผิดจากความเป็นจริง การออกแบบที่ถูกต้องแม่นยำจะช่วยลดต้นทุนการดำเนินการก่อสร้างโรงบำบัดน้ำเสีย การมีค่า k ที่ถูกต้องสำหรับน้ำเสียจากโรงงานแต่ละประเภท จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงด้วย

2.3 อิทธิพลขององค์ประกอบต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพของสระเติมอากาศ

2.3.1 ธาตุอาหาร

ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีใช้ออกซิเจน โดยทั่วไปแบกทีเรียจะต้องได้ธาตุอาหารอย่างพอเพียง จึงจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ธาตุอาหารที่แบกทีเรียต้องการมีหลายชนิดในปริมาณต่างๆกัน ส่วนใหญ่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก โซเดียม และแมกนีเซียม ที่ต้องการมากเป็นพิเศษ คือ ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ซึ่งต้องมีปริมาณในสัดส่วนที่ถูกต้อง ถ้าหากปริมาณไม่ได้สัดส่วนที่ถูกต้องจะทำให้แบกทีเรียเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร

ระบบบำบัดชนิดสระเติมอากาศซึ่งเป็นระบบ Low Rate มีอัตราการสร้างเซลล์ต่ำ ปริมาณความต้องการ N และ P มีน้อยกว่าระบบ High Rate มาก ซึ่งโดยทั่วไประบบ High Rate ต้องการอัตราส่วน BOD : N: P ประมาณไม่น้อยกว่า 100 : 5 : 1 แต่ในระบบ Low Rate การศึกษาของ GELLMAN (1963)ได้ศึกษาหาความต้องการ N ของสระเติมอากาศในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ พบว่าต้องการ N ในอัตราส่วน BOD : N = 60 : 1 CROWN ZELLERBACH CORPORATION (1970)ในการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษ พบว่า P ในอัตราส่วน BOD : P = 160 : 1, 80 : 1 และ 40 : 1 ไม่มีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

2.3.2 อัตราการกวนน้ำในสระ

ในสระบำบัดซึ่งอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) อัตราการกวนน้ำในสระ (degree of mixing) จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการทำงานของสระเติมอากาศ ถ้าอัตราการกวนน้ำสูงมาก ตะกอนสารอินทรีย์จะลอยตัวในน้ำทิ้งทำให้น้ำทิ้งขุ่น ถ้าอัตราการกวนน้ำต่ำจะเกิดการตกตะกอนน้ำทิ้งที่ได้จะใสกว่า

2.3.3 ค่าพีเอช

ในปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบกทีเรีย ไม่ว่าจะเป็นในระบบสระเติมอากาศหรือระบบบำบัดด้วยวิธีชีววิทยาอื่นๆ ค่าพีเอชจะมีอิทธิพลมากต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากแบกทีเรียต้องการค่าพีเอชที่เหมาะสมค่าหนึ่งในการที่จะปล่อยน้ำย่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Exoenzymes) (Metcalf,1979) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลง เพื่อสะดวกในการดูดซึมเข้าภายในเซลล์ ระบบบำบัดด้วยวิธีชีววิทยาต่างๆจึงต้องการค่าพีเอชที่เหมาะสมในช่วงระหว่าง 7-8

2.3.4 อุณหภูมิ

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสระเติมอากาศซึ่งวัดได้เป็นค่า k นั้น จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังสมการ

$$k_T = k_{20}\ \theta^{(T-20)}$$

เมื่อ k_T = ค่าคงที่ k ที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส

θ = ค่าคงที่ มีค่าได้ตั้งแต่ 1.00 - 1.250

ถ้า θ มีค่า 1.10 และอุณหภูมิเพิ่มจาก 20 องศาเซลเซียสเป็น 30 องศาเซลเซียส ค่า k จะเพิ่มขึ้นถึง 2.5 เท่า

ค่า θ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ช่วงของอุณหภูมิ Food to Microorganism Ratio (F/M Ratio) ชนิดของสารอินทรีย์ ฯลฯ ECKENFELDER (1966) รายงานค่า θ ในช่วงระหว่าง 1.06-1.09 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติใช้ค่า θ = 1.035 กันโดยทั่วไปในการคำนวณออกแบบระบบสระเติมอากาศ (Mara,1976)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ค่า θ ของระบบบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ (SORAB,1973)

PROCESS	θ
Activated sludge	1.00 - 1.03
Extended aeration	1.00 - 1.01
Trickling filter	1.035
Aerobic flow - through lagoon	1.035
Aerobic facultative lagoon	1.08 - 1.09
Waste stabilisation pond	1.09
BOD bottle	1.056 (between 20-30° C)
	1.135 (between 4-20° C)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย