บทที่ 2

ทฤษฎีของบ่อเติมอากาศ

2.1 หลักการทั่วไป

การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยระบบบ่อเติมอากาศอาศัยปฏิกริยาชีวเคมีแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Action) โดยแบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นพลังงานในการเจริญเติบโต และสร้างเซลล์ใหม่ ดังในสมการที่ (ก) และ (ข)

$$\text{Organics} + O_2 + \text{Bacteria} \longrightarrow CO_2 + H_2O + N\bar{O}_3 + S\bar{\bar{O}}_4 + \text{Energy} \quad (ก)$$

$$\text{Organics} + \text{Energy} + \text{Bacteria} \longrightarrow 2\ \text{Bacteria} \quad (ข)$$

ปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสมการ (ก) สำหรับในบ่อเติมอากาศจะมีอัตราเร็วกว่าใน Oxidation Ponds เพราะปริมาณออกซิเจนมีอย่างพอเพียงจนไม่เป็นตัวจำกัด (Constraints) ของปฏิกริยา แต่เนื่องจากไม่มีการควบคุมปริมาณแบคทีเรีย ดังนั้นปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในบ่อเติมอากาศจึงช้ากว่าในระบบ Activated Sludge มาก

โดยที่การทำงานของบ่อเติมอากาศ เป็นแบบ Once Through คือไม่มีการหมุนเวียนของตะกอนแบคทีเรีย (Bacterial Recirculation) ดังนั้นระยะเวลาที่น้ำทิ้งถูกกักอยู่ในบ่อเติมอากาศ (Hydraulic Retention Time = HRT) จึงเท่ากับเวลาเฉลี่ยที่แบคทีเรียถูกกักอยู่ในบ่อเติมอากาศด้วย (Mean Cell Residence Time หรือ Solids Retention Time = SRT)

นั่นคือ ค่า HRT = SRT บ่อเติมอากาศจึงต้องใหญ่พอที่จะกักเก็บน้ำไว้ได้หลายวัน เพื่อให้ค่า HRT สูงกว่าระยะเวลาในการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย (Cell Reproduction Time) มิฉะนั้นจะไม่มีแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศเพียงพอแก่การทำลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ในกรณีเช่นนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดจะต่ำมาก

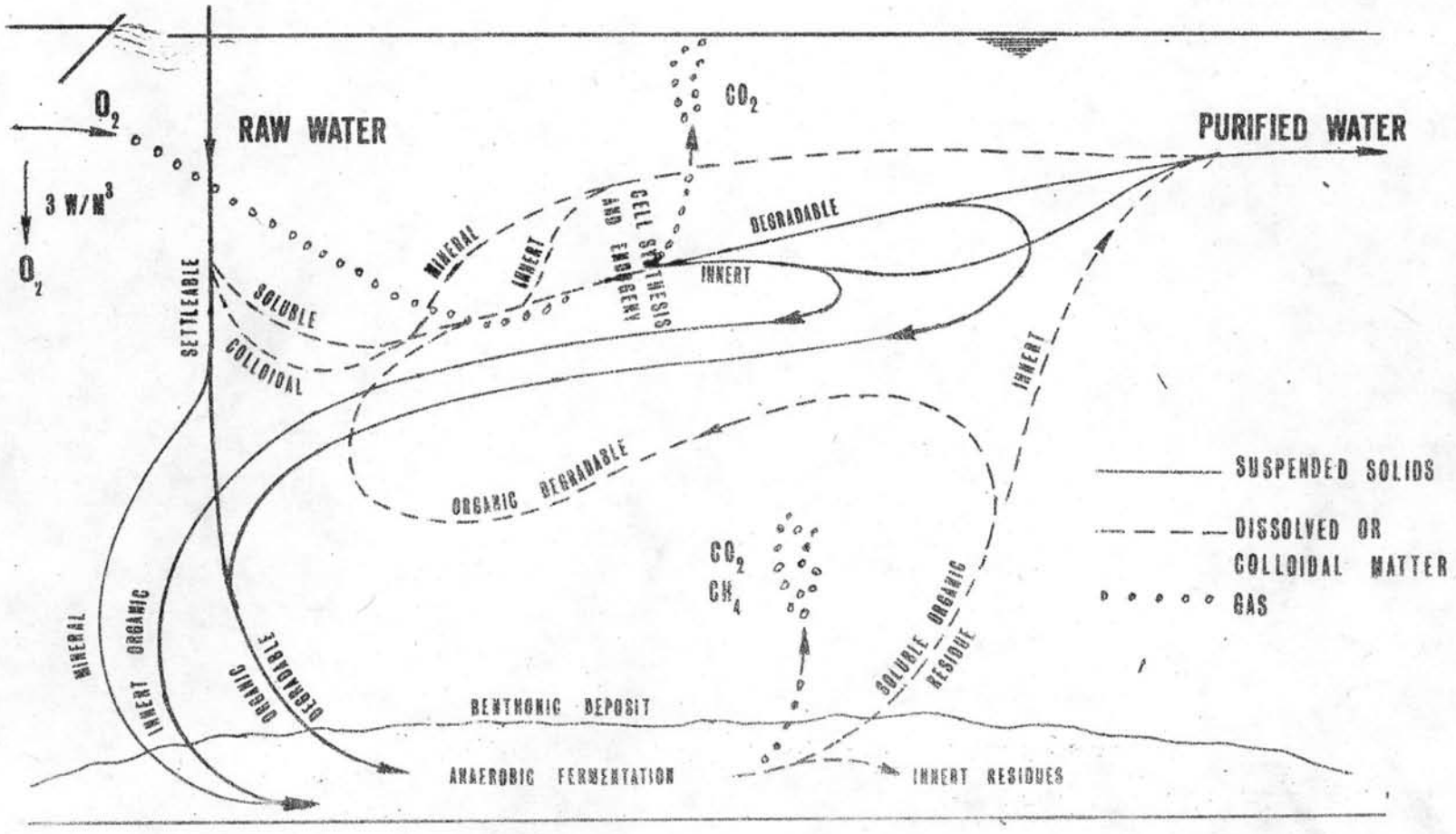
เนื่องจากบ่อเติมอากาศมีค่า HRT หลายวัน การดำรงชีพของแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศจึงอยู่ในขั้น Endogeneous Phase แบคทีเรียที่เกิดเพิ่มขึ้นจะถูกย่อยสลาย กลายเป็นพลังงานและอาหารของแบคทีเรียที่เหลืออยู่ อัตราการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศจึงต่ำมาก จนปริมาณแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศวัดเป็นค่า MLSS ได้ต่ำมาก อาจไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตร จึงไม่มีตะกอนส่วนเกินที่จะต้องกำจัดเป็นปัญหายุ่งยากเช่นในระบบ Activated Sludge ซึ่งเพาะเลี้ยงแบคทีเรียไว้มากจนเป็นตะกอนข้น ค่า MLSS อาจสูงถึง 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร

อัตราเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งของบ่อเติมอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมหลายประการ ที่สำคัญได้แก่ pH อุณหภูมิ ปริมาณอาหารเสริมสร้าง ความเข้มข้นของสารละลายออกซิเจนในบ่อ และความยากง่ายในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

บ่อเติมอากาศแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ (METCALF and EDDY, 1972; BEBIN, 1973)

1. <u>Facultative Aerated Lagoons</u> ในบ่อเติมอากาศแบบนี้กำลังแรงม้าของเครื่องเติมอากาศจะพอเพียงที่จะให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรีย แต่ไม่พอเพียงที่จะกวนน้ำในบ่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ตะกอนส่วนใหญ่ที่ปนติดมากับน้ำทิ้ง และตะกอนแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในบ่อจมตัวลงก้นบ่อ สารอินทรีย์ในตะกอนจะสลายตัวในสภาวะไร้ออกซิเจน กลายเป็นแก๊สมีเทนและสารละลายอินทรีย์ ซึ่งจะถูกทำลายไปพร้อมกับสารละลายอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ดังแผนผังในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 FACULTATIVE AERATED LAGOON



2. Aerobic Aerated Lagoons ในบ่อเติมอากาศแบบนี้ การเติมอากาศจะมีอัตราสูงพอที่จะกระจายออกซิเจนไปทุกจุดทั่วบ่อและเพียงพอที่จะกวนให้น้ำในบ่อผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Completely Mixed) จึงไม่มีการตกตะกอนของเซลล์แบคทีเรียหรือของตะกอนในน้ำทิ้ง ตะกอนจะปนติดไปกับน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อเติมอากาศด้วย ทำให้น้ำทิ้งหลังการกำจัดมีค่า BOD และ SS หรือความขุ่นสูงกว่าปกติ โดยทั่วไปสำหรับบ่อชนิดนี้จะต้องนำน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อมาตกตะกอนเพื่อลดค่า BOD และความขุ่นลงอีก

ในทางปฏิบัติ ระบบบ่อเติมอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยบ่อเติมอากาศหลายบ่อเรียงต่อกันแบบอนุกรม ในกรณีที่น้ำทิ้งมีค่า BOD สูงมาก อาจจำเป็นต้องใช้บ่อหมัก (Anaerobic Lagoons) กำจัดสารอินทรีย์บางส่วนออกเสียก่อน แล้วจึงกำจัดต่อด้วยระบบบ่อเติมอากาศ โดยทั่วไปอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในบ่อเติมอากาศสองบ่อ ซึ่งต่อกันแบบอนุกรมจะไม่เท่ากัน โดยที่อัตราการย่อยสลายในบ่อที่สองจะต่ำกว่าในบ่อแรก (WESTON and STACK, 1960) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายได้ถูกทำลายไปแล้วในบ่อแรก ทำให้สารอินทรีย์ที่เข้าสู่บ่อที่สองส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก

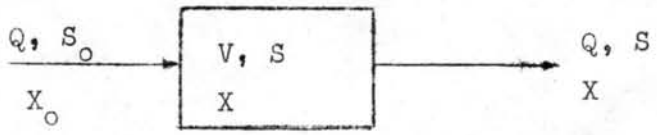
KORMANIK (1972) TIKHE (1975) และ WHITE and RICH (1976) ได้เสนอแนะว่า การออกแบบระบบบ่อเติมอากาศให้บ่อแรกเป็นบ่อแบบ Aerobic และบ่อหลังเป็นบ่อแบบ Facultative จะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการที่จะใช้บ่อแบบ Aerobic หรือบ่อแบบ Facultative ทั้งสองบ่อ

2.2 Kinetics ของระบบบ่อเติมอากาศ

2.2.1 บ่อแบบ Aerobic

(1) การกำจัด BOD ในบ่อแบบ Aerobic น้ำในบ่อจะผสมกันทั่วถึง ทำให้คุณลักษณะของน้ำในบ่อเหมือนกันทุกจุด รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังของบ่อเติมอากาศ ซึ่งจะใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษา Kinetics

รูปที่ 2.2 แผนผังของบ่อเติมอากาศ



ถ้าให้ S_o = ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่เข้าบ่อ, มิลลิกรัม/ลิตร

S = ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อ, มิลลิกรัม/ลิตร

Q = ปริมาณน้ำทิ้ง, ลูกบาศก์เมตร/วัน

V = ปริมาตรบ่อ, ลูกบาศก์เมตร

t = เวลาในการเติมอากาศ, วัน

X_o = ความเข้มข้นของแบคทีเรียในน้ำทิ้งที่เข้าบ่อ, มิลลิกรัม/ลิตร

X = ความเข้มข้นของแบคทีเรียในน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อ, มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อการทำงานของบ่อเติมอากาศอยู่ในสถานะคงที่ (Steady State) จะเขียนสมการแสดง BOD Balance ได้ดังนี้

$$\text{BOD Balance} \quad V\frac{dS}{dt} = QS_o - QS \qquad (1)$$

ถ้าถือว่าปฏิกริยาการทำลาย BOD โดยแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศเป็น First-Order Reaction อัตราการลดค่า BOD หรือ dS/dt จะเป็นปฏิภาคตรงกับค่า BOD ของน้ำทิ้งในขณะนั้น

ดังนั้น $\frac{dS}{dt} = KS$ (2)

ในเมื่อ K = สัมประสิทธิ์การทำลาย BOD, วัน$^{-1}$

แทนค่า dS/dt จากสมการ (2) ลงในสมการ (1) จะได้

$$VKS = QS_o - QS \quad (3)$$

เนื่องจาก $t = V/Q$ (4)

ดังนั้นสมการ (3) จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{S}{S_o} = \frac{1}{1 + Kt} \quad (5)$$

หรือ $Kt = \frac{(S_o - S)}{S}$ (6)

สมการ (5) ใช้กันมากที่สุดในทางปฏิบัติในการคำนวณขนาดของบ่อเติมอากาศ เมื่อรู้ค่า K ซึ่งจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0.25 - 1.0 (METCALF and EDDY, 1972)

(2) <u>การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย</u> จากแผนผังในรูปที่ 2.2 จะเขียนสมการแสดง Bacteria Balance ได้ดังนี้คือ

$$V\frac{dX}{dt} = QX - QX_o \quad (7)$$

โดยทั่วไป X_o จะมีค่าน้อยมาก จนตัดทิ้งได้

ดังนั้น $$\frac{dX}{dt} = \frac{QX}{V} = \frac{X}{t} \qquad (8)$$

ตามหลักของ Bacterial Kinetics dX/dt จะเขียนได้เป็น (METCALF and EDDY, 1972)

$$\frac{dX}{dt} = a\frac{dS}{dt} - bX \qquad (9)$$

ในเมื่อ a = สัมประสิทธิ์ในการเติบโตของแบคทีเรีย, ปริมาณแบคทีเรีย/ปริมาณ BOD ที่ถูกทำลายไป

b = สัมประสิทธิ์การย่อยสลายตัวของแบคทีเรีย, เวลา$^{-1}$

แทนค่า dX/dt จากสมการ (9) ลงในสมการ (8) จะได้

$$\frac{X}{t} = a\frac{dS}{dt} - bX \qquad (10)$$

จากสมการ (1) $$\frac{dS}{dt} = \frac{(S_o - S)}{t} \qquad (11)$$

แทนค่า dS/dt จากสมการ (11) ลงในสมการ (10) จะได้

$$\frac{X}{t} = \frac{a(S_o - S)}{t} - bX \qquad (12)$$

ซึ่งเขียนได้เป็น $$X = \frac{a(S_o - S)}{(1 + bt)} \qquad (13)$$

(3) <u>ปริมาณความต้องการออกซิเจน</u> ความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียในบ่อเติมอากาศแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

1) ใช้ในการทำลายสารอินทรีย์ (BOD) เพื่อให้ได้พลังงานที่จำเป็นในการเจริญเติบโต

2) ใช้ในการย่อยสลายเซลล์แบคทีเรีย ที่เรียกว่า Endogeneous Respiration

ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในบ่อเติมอากาศจึงเขียนได้เป็น (BEBIN, 1973)

$$RV = a'(S_o - S)\,Q + b'XV \qquad (14)$$

หรือ $$R = a'\frac{(S_o - S)}{t} + b'X \qquad (15)$$

ในเมื่อ R = ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ, มิลลิกรัม/วัน

a' = อัตราส่วนปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเจริญเติบโต, มิลลิกรัมออกซิเจน/มิลลิกรัม BOD ที่ถูกทำลาย

b' = อัตราส่วนปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายเซลล์แบคทีเรีย, มิลลิกรัมออกซิเจน/มิลลิกรัม ตะกอนแบคทีเรีย/วัน

เมื่อแทนค่า X ในสมการ (13) ลงในสมการ (14) จะได้

$$RV = a'(S_o - S)\,Q + b'a\,\frac{(S_o - S)\,V}{(1 + bt)} \qquad (16)$$

จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{RV}{(S_o - S)\,Q} = a' + \frac{b'at}{1 + bt} \qquad (17)$$

ในระบบกำจัดที่อัตราการรับ BOD ต่อหน่วยปริมาตรของบ่อต่ำมาก (Low Organic Loading) ปฏิกริยา Nitrification อาจเกิดขึ้นได้ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการสำหรับ Nitrification คิดได้จากสมการ

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+ \qquad (18)$$

ตามสมการ (18) แบคทีเรียจะต้องใช้ออกซิเจนประมาณ 4.6 เท่าของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน อัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับปฏิกริยา Nitrification จึงเขียนได้เป็น

$$R_N = 4.6\,\frac{\Delta NH_3 - N}{t} \qquad (19)$$

ในเมื่อ R_N = อัตราการใช้ออกซิเจนสำหรับปฏิกริยา Nitrification, มิลลิกรัม

ΔNH_3 = ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ถูกกำจัด, มิลลิกรัม

t = เวลาในการเติมอากาศ, วัน

ดังนั้น การคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในกรณีที่เกิดปฏิกริยา Nitrification จึงคำนวณได้จากสูตร

$$R = \frac{a'(S_o - S)}{t} + b'X + 4.6\,\frac{\Delta NH_3}{t} \qquad (20)$$

(4) ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่ผ่านการกำจัด ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อเติมอากาศ จะประกอบด้วยค่า BOD ของสารอินทรีย์ที่ละลายได้ (Soluble BOD) และค่า BOD เนื่องจาก Volatile Solids สำหรับน้ำทิ้งจากชุมชน (ARCEIVALA, 1973) คำนวณค่า BOD ของน้ำทิ้งโดยใช้สูตร

$$\text{Effluent BOD} = S_e + 0.84\ X$$

และ RICH and WHITE (1977) แนะนำให้ใช้สูตร

$$\text{Effluent BOD} = S_e + 0.54\ X$$

ในเมื่อ S_e = ค่า BOD ที่คำนวณได้จากสมการ

จะเห็นได้ว่า ARCEIVALA (1973) กำหนดค่า BOD เนื่องจาก Volatile Solids สูงกว่าที่ RICH and WHITE (1977) กำหนด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า BOD ของ Volatile Solids จะขึ้นอยู่กับ Sludge Age ดังนั้น Sludge Age ต่างกันจะให้ค่า BOD ต่างกันด้วย

(5) ระยะเวลาต่ำสุดในการเติมอากาศ ดังได้กล่าวในหัวข้อ (2.1) แล้วว่า การทำงานของบ่อเติมอากาศเป็นแบบ Once-Through ปริมาณแบคทีเรียที่เกิดเพิ่มขึ้นจึงปนติดไปกับน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ ดังนั้นเวลาในการเติมอากาศจึงต้องนานกว่าเวลาที่แบคทีเรียต้องการในการแบ่งเซลล์ มิฉะนั้นจะไม่มีแบคทีเรียอยู่ในระบบ สำหรับน้ำทิ้งจากชุมชน RICH and WHITE (1977) กำหนดระยะเวลาต่ำสุดในการเติมอากาศที่ต้องการระหว่าง 0.75 - 1 วัน หรือ

$$t_c = (0.33\ a\ S_o)^{-1}$$

ในเมื่อ t_c = ระยะเวลาต่ำสุดในการเติมอากาศที่ต้องการ หรือ Critical Retention Time

2.2.2 <u>บ่อแบบ Facultative</u> เนื่องจากบ่อแบบ Aerobic ต้องใช้กำลังงานในการกวนน้ำในบ่อสูงมาก ในทางปฏิบัติบ่อแบบ Facultative จึงนิยมใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรียในบ่อแบบ Facultative ต่ำมาก ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัด BOD จึงขึ้นกับเวลาในการเติมอากาศ อุณหภูมิ และสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

ในการคำนวณออกแบบบ่อแบบ Facultative นิยมใช้สูตรของ ECKENFELDER (1966) ซึ่งแสดงไว้ในสมการ (5) กล่าวคือ

$$\frac{S}{S_o} = \frac{1}{1 + Kt}$$ 005951

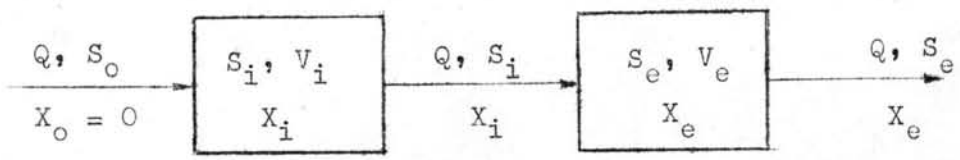
ค่า K ในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และลักษณะการออกแบบบ่อ ดังนั้นสำหรับน้ำทิ้งชนิดเดียวกัน K จึงอาจมีค่าแปรผันในช่วงที่กว้างมาก (BARTSCH and RANDALL, 1971) เช่นสำหรับน้ำทิ้งจากชุมชน K จะมีค่าได้ตั้งแต่ 0.3 ถึงกว่า 1.0 ในการศึกษาระบบบ่อเติมอากาศของโรงงานน้ำตาลกรุงไทย VISUTHIRUNGSIURI (1976) พบว่าค่า K ของบ่อเติมอากาศทั้งสองบ่อมีค่าใกล้เคียงกันและประมาณ 1.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในหนังสือคู่มือของ AQUA-AEROBIC SYSTEMS แนะนำให้ใช้ค่า K = 1.0 สำหรับน้ำทิ้งจากชุมชน ค่า K ที่คำนวณจากข้อมูลในตารางที่ 2.2 แปรผันตั้งแต่ 0.2 - 3.6 สรุปได้ว่าค่า K ควรจะหาจากการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับเฉพาะกรณี

2.2.3 <u>บ่อแบบ Aerobic ต่อกับบ่อแบบ Facultative</u> ระบบบ่อเติมอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วยบ่อมากกว่าหนึ่งบ่อเรียงต่อกันแบบอนุกรม

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัด BOD เท่ากัน ถ้าใช้บ่อเติมอากาศใหญ่เพียงบ่อเดียว ปริมาตรบ่อหรือเวลาในการเติมอากาศที่ต้องใช้จะมากกว่าปริมาตรรวมหรือเวลาในการเติมอากาศรวมของบ่อเติมอากาศย่อยทุกบ่อรวมกัน

KORMANIK (1972) ได้แนะนำให้ใช้ระบบบ่อเติมอากาศที่ประกอบด้วยบ่อเติมอากาศ 2 บ่อ บ่อแรกเป็นบ่อแบบ Aerobic บ่อหลังเป็นบ่อแบบ Facultative TIKHE (1975) เรียกระบบบ่อเติมอากาศแบบนี้ว่าระบบบ่อเติมอากาศแบบ Aerofac แผนผังของระบบบ่อเติมอากาศแบบ Aerofac แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ระบบบ่อเติมอากาศแบบ Aerofac



Aerobic Aerated Lagoon

Facultative Lagoon

TIKHE (1975) โดยอาศัยทฤษฎีของบ่อเติมอากาศแบบ Aerobic แสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของระบบบ่อเติมอากาศแบบ Aerofac ดังต่อไปนี้

ที่สถานะสมดุลย์ Bacterial Balance ของบ่อเติมอากาศที่ 1 จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q\ a\ (S_o - S_i) = bX_iV + QX_i$$

เนื่องจาก $V/Q = t_1$ ดังนั้น

$$X_i = \frac{a\ (S_o - S_i)}{1 + bt_1}$$

ในเมื่อ X_i = ค่า MLVSS, มก./ล.

a = สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย, มก./ล. ของ VSS ต่อ มก./ล. ของ BOD ที่ถูกทำลาย

b = อัตราการสลายตัวของแบคทีเรีย, วัน $^{-1}$

S_o = ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่เข้าบ่อกำจัด, มก./ล.

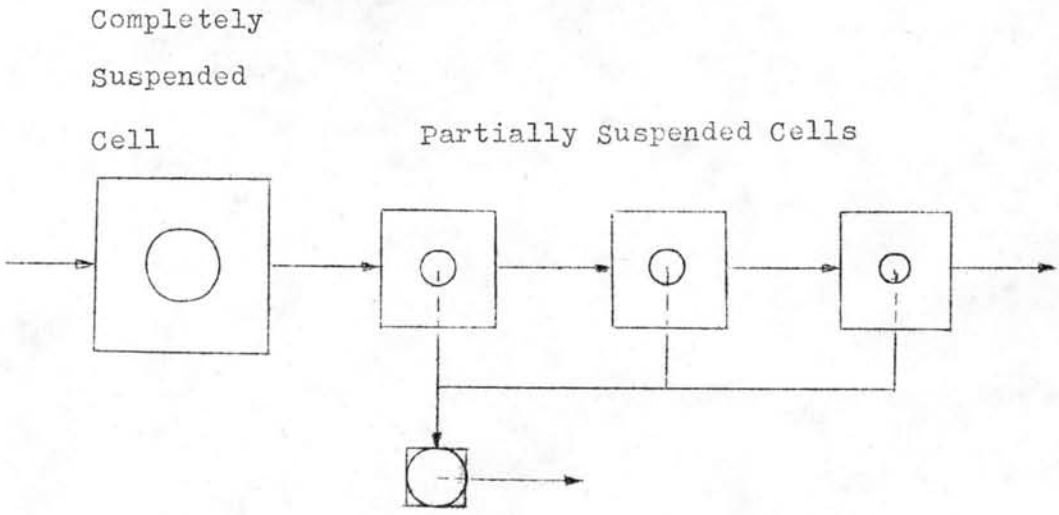
S_i = ค่า BOD ของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อกำจัด, มก./ล.

t_1 = เวลาเติมอากาศในบ่อที่ 1, วัน

2.2.4 บ่อแบบ Aerobic ต่อกับบ่อแบบ Facultative 3 บ่อ

WHITE & RICH (1977) เสนอวาระบบบ่อเติมอากาศที่ประกอบด้วยบ่อแบบ Aerobic 1 บ่อ ติดตามด้วยบ่อแบบ Facultative อีก 3 บ่อ จะใช้ปริมาตรน้อยกว่าระบบบ่อเติมอากาศแบบ Aerofac ซึ่งมี 2 บ่อ รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังระบบบ่อเติมอากาศแบบ 4 บ่อดังกล่าว

รูปที่ 2.4 ระบบบ่อเติมอากาศ 4 บ่อ



Solids Stabilizer Completely Suspended

2.3 อิทธิพลขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพของบ่อเติมอากาศ

2.3.1 อาหารเสริมสร้าง ในการกำจัดน้ำทิ้งด้วยวิธีใช้ออกซิเจนโดยทั่วไป แบคทีเรียจะต้องได้อาหารเสริมสร้างอย่างพอเพียง จึงจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาหารเสริมสร้างที่แบคทีเรียต้องการมีหลายชนิดในปริมาณต่าง ๆ กัน ส่วนใหญ่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติอย่างพอเพียง เช่น โปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก โซเดียม และแมกนีเซียม คงมีแต่ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) เท่านั้นที่ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีไม่พอเพียง จำเป็นต้องเติมลงไปในน้ำทิ้งในรูปของสารประกอบที่ย่อยสลายง่าย เช่น N ในรูปของยูเรียหรือเกลือแอมโมเนียม และ P ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต หากปริมาณ N หรือ P ไม่ได้สัดส่วนที่ถูกต้องกับปริมาณ BOD แล้ว จะทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร เชื้อรา (Fungi) จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรีย เพราะเซลล์ของเชื้อราต้องการ N น้อยกว่าเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ และตะกอนแบคทีเรียที่เกิดขึ้นไม่จมตัว ทำให้น้ำทิ้งหลังการกำจัดขุ่นมากเกินไป

ในระบบกำจัดแบบ High Rate เช่นแบบ Activated Sludge นั้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของ BOD : N : P ประมาณ 100 : 5 : 1 ซึ่งต้องใช้ N และ P ค่อนข้างมาก เพราะอัตราการสร้างเซลล์ของแบคทีเรียค่อนข้างสูง ส่วนในระบบบ่อเติมอากาศซึ่งเป็นระบบ Low Rate มีอัตราการสร้างเซลล์ต่ำ ปริมาณ N, P ที่ใช้จะน้อยกว่าในระบบ High Rate มาก GELLMAN (1963) ได้ศึกษาหาความต้องการ N ของบ่อเติมอากาศในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ พบว่าต้องการ N ในอัตราส่วน BOD : N = 60 : 1 CROWN ZELLERBACH CORPORATION (1970) ในการทดลองกำจัดน้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อกระดาษ พบว่า P ในอัตราส่วน BOD : P 160 : 1, 80 : 1 และ 40 : 1 ไม่มีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

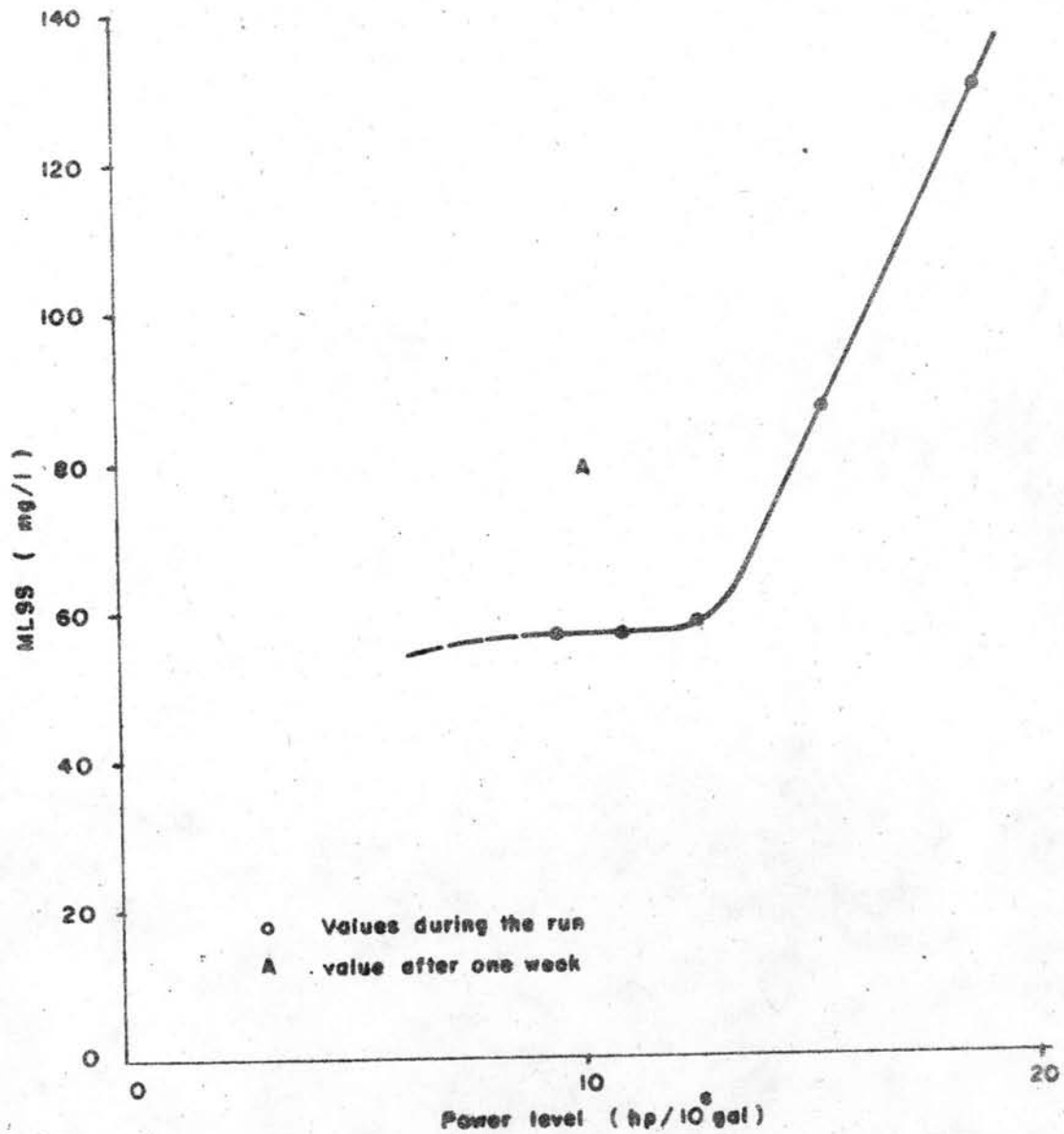
2.3.2 อัตราการกวนน้ำในบ่อ ในบ่อกำจัดซึ่งอยู่ในสถานะคงที่ อัตราการกวนน้ำในบ่อ (Degree of Mixing) จะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อประสิทธิภาพการทำงานของบ่อเติมอากาศ ถ้าอัตราการกวนน้ำสูงมาก ตะกอนสารอินทรีย์จะลอยตัวในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งขุ่น ถ้าอัตราการกวนน้ำต่ำ จะเกิดการตกตะกอนน้ำทิ้งที่ได้จะใสกว่า

อัตราการกวนน้ำในบ่อขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องเติมอากาศที่ใช้และกำลังงานของเครื่องเติมอากาศต่อหน่วยปริมาตรของบ่อ หรือระดับกำลังงาน (Power Level) คิดเป็นแรงม้า/ลูกบาศก์เมตร รูปที่ 2.5 แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า MLSS ในบ่อเติมอากาศที่กำจัดน้ำทิ้งจากชุมชนกับระดับกำลังงาน (EPA, 1971) จะเห็นได้ว่า ในช่วงระหว่าง 13 - 20 แรงม้า/ล้านแกลลอน (3.4 - 5.3 แรงม้า/1,000 ลูกบาศก์เมตร) ค่า MLSS จะเป็นสัดส่วนตรงกับระดับกำลังงาน แต่ในช่วงระหว่าง 9 - 13 แรงม้า/ล้านแกลลอน ค่า MLSS มีค่าคงที่ 57 มิลลิกรัม/ลิตร ความสัมพันธ์ระหว่างค่า MLSS กับระดับกำลังงานดังในรูปที่ 2.5 ไม่แน่นอนเสมอไป ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองกับน้ำทิ้งหลายแห่งในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ค่า MLSS จะลดลงตามระดับกำลังงานตลอดช่วงระหว่าง 10 - 40 แรงม้า/ล้านแกลลอน (2.6 - 10.6 แรงม้า/1,000 ลูกบาศก์เมตร) MLSS เปลี่ยนแปลงจากประมาณ 60 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 150 มิลลิกรัม/ลิตร จึงสรุปได้ว่าค่า MLSS นั้นที่ระดับกำลังงานค่าหนึ่งไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนได้ จะบอกได้แต่เพียงว่า ค่า MLSS จะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มระดับกำลังงาน จะเป็นเท่าใดนั้น คงจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำทิ้ง ประสิทธิภาพในการกวนน้ำของเครื่องเติมอากาศ และรูปร่างของบ่อเติมอากาศ

2.3.3 ค่า pH ในปฏิกริยาการทำลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย ไม่ว่าจะเป็นในระบบบ่อเติมอากาศ ระบบ Activated Sludge หรือระบบกำจัดด้วยวิธีชีววิทยาอื่น ๆ ก็ตาม ค่า pH จะมีอิทธิพลมากต่อประสิทธิภาพของระบบ-

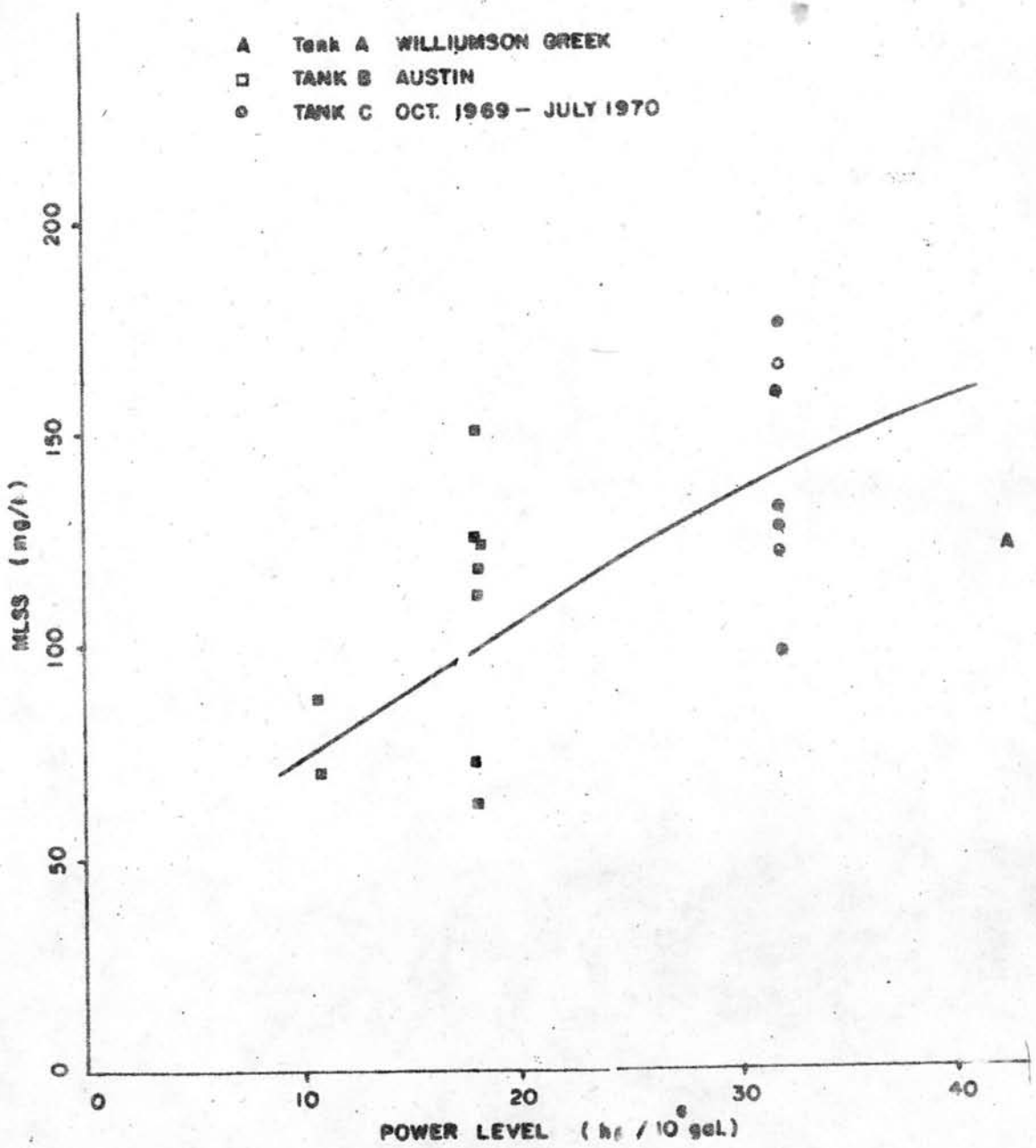
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานกับ MLSS

(after EPA 1971-)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานกับ MLSS

MLSS AND POWER LEVEL (after EPA 1971)



กำจัด เนื่องจากแบคทีเรียต้องการค่า pH ที่เหมาะสมค่าหนึ่งในการที่จะปล่อยน้ำย่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Exoenzymes) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลง เพื่อสดวกในการดูดซึมเข้าไปย่อยสลายภายในเซลล์ ระบบกำจัดด้วยวิธีชีววิทยาต่าง ๆ จึงต้องการค่า pH ที่เหมาะสมในช่วงระหว่าง 7 - 8

รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด BOD จะสูงที่สุดเมื่อค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 6 - 7.5 ถ้าค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง เช่นที่ค่า pH 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัด BOD เหลือประมาณ 80 % เมื่อเทียบกับ 90 % ที่ค่า pH ประมาณ 7

2.3.4 <u>อุณหภูมิ</u> อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ ซึ่งวัดได้เป็นค่า K นั้น จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิดังสมการ

$$K_T = K_{20}\,\theta^{(T-20)}$$

ในเมื่อ K_T = ค่า K ที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส

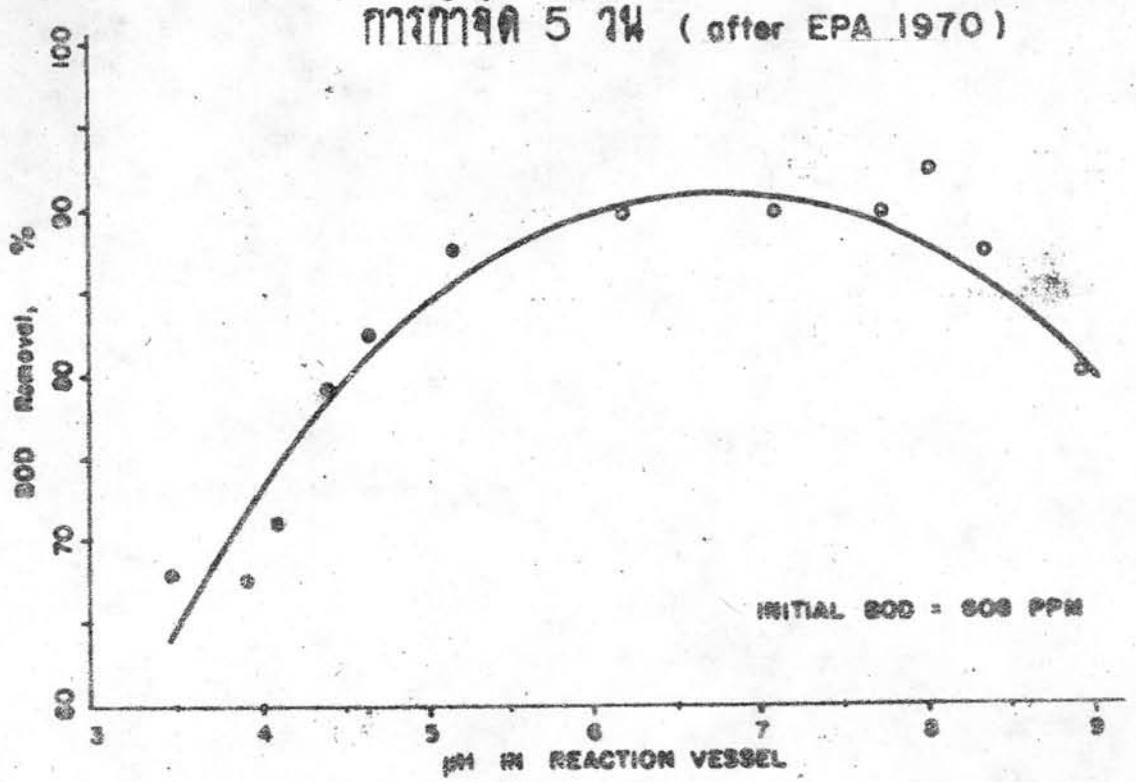
K_{20} = ค่า K ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

θ = ตัวคงที่ มีค่าได้ตั้งแต่ 1.00 - 1.250

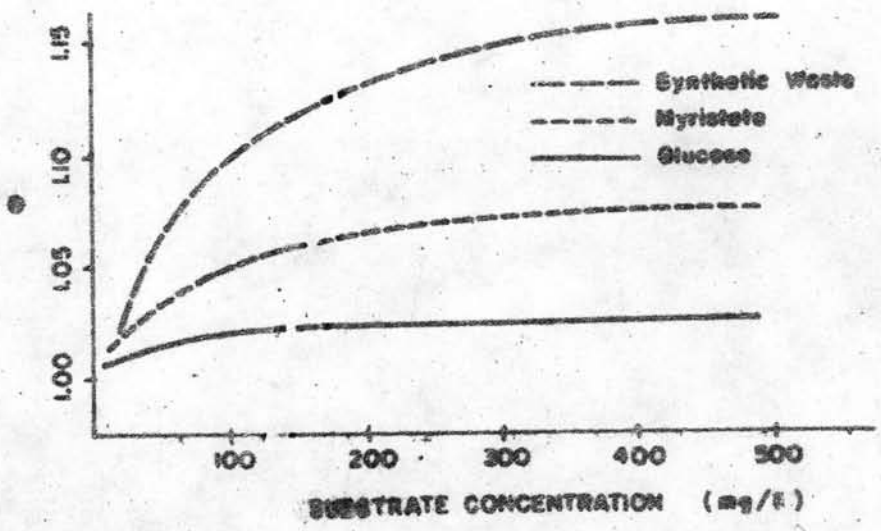
ถ้า θ มีค่า 1.10 และอุณหภูมิเพิ่มจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 30 องศาเซลเซียส ค่า K จะเพิ่มขึ้นถึง 2.5 เท่า

ค่า θ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการเช่น ช่วงของอุณหภูมิ Food to Microorganisms Ratio (F/M Ratio) ชนิดของสารอินทรีย์ ฯลฯ ECKENFELDER (1966) รายงานค่า θ ในช่วงระหว่าง 1.06 - 1.09

รูปที่ 2.7 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาในการกำจัด 5 วัน (after EPA 1970)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ กับ อาหาร (after Novak 1974)

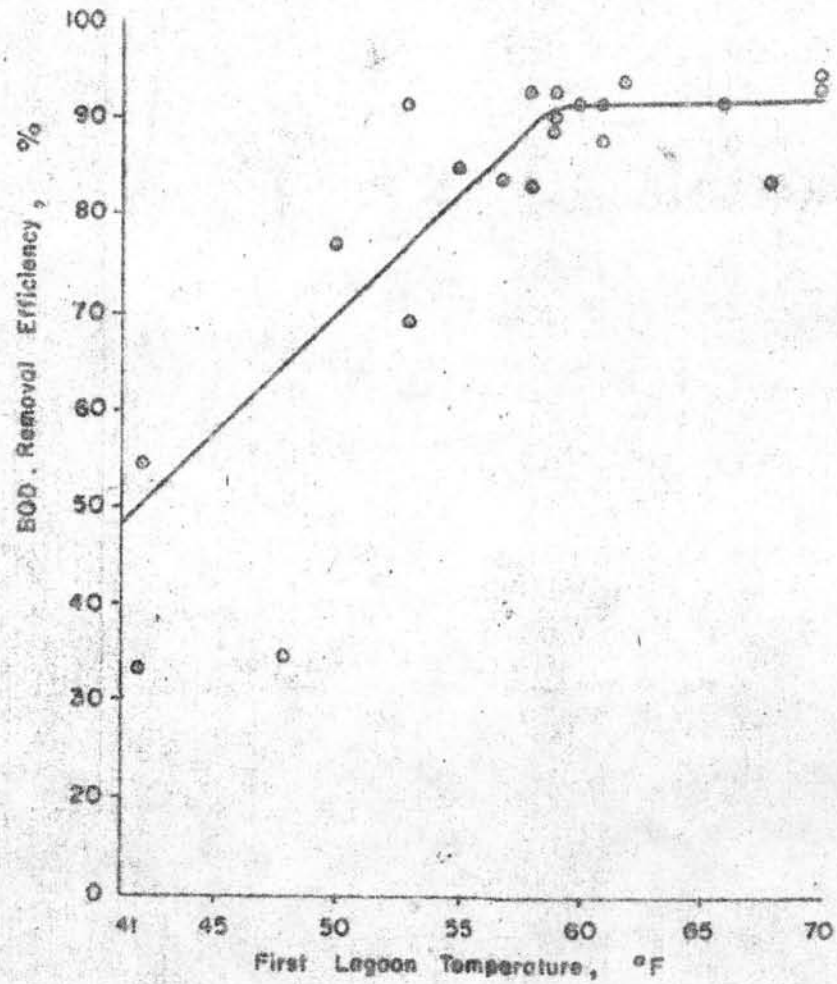


สำหรับบอแบบ Facultative ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10 - 30 องศาเซลเซียส SAWYER (1968) รายงานค่า $\theta = 1.035$ สำหรับบอแบบ Aerobic NOVAK (1974) พบว่าในบอแบบ Aerobic ค่า θ จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของแบคทีเรีย (Substrate Concentration) ดังในรูปที่ 2.8 ค่า θ เพิ่มจากประมาณ 1.0 เมื่อความเข้มข้นของอาหารแบคทีเรียต่ำจนถึง 1.18 ที่ความเข้มข้นสูง จึงสรุปได้ว่าค่า θ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์และชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และขณะนี้ยังไม่มีข้อยุติในเรื่องค่าที่แน่นอนของ θ (BARTSCH and RANDALL, 1971) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติใช้ค่า θ 1.08 กันโดยทั่วไปในการคำนวณออกแบบระบบบอเติมอากาศ (EPA, 1971)

รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า BOD ของน้ำทิ้งจากโรงงานทอผ้าหลังจากผ่านการกำจัดในบอที่ 1 ซึ่งมีระดับกำลังงาน 43 แรงม้า/ล้านแกลลอน (11.4 แรงม้า/ 1,000 ลูกบาศก์เมตร) และใช้เวลาในการเติมอากาศ 2 วัน ค่า BOD ก่อนการกำจัดอยู่ในช่วงระหว่าง 300 - 400 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่า SS ต่ำมากเนื่องจากผ่านการกำจัดขั้นต้นโดยผ่านการตกตะกอนด้วยปูนขาว (BARTSCH and RANDALL, 1971) จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิเกิน 60 องศาฟาเรนไฮต์ (15.5 องศาเซลเซียส) บอเติมอากาศนี้สามารถกำจัด BOD ได้ถึง 90 % คิดค่า K ที่ 20 องศาเซลเซียสได้ถึง 2.5 ต่อวัน เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 60 องศาฟาเรนไฮต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเหลือเพียงประมาณ 50 % ที่อุณหภูมิ 42 องศาฟาเรนไฮต์ (5.5 องศาเซลเซียส)

รูปที่ 2.9 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการกำจัด

(after BARTSCH and RANDALL 1971)



2.4 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบ่อเติมอากาศ

บ่อเติมอากาศเป็นระบบกำจัดน้ำทิ้งที่ใช้กันแพร่หลายในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน เนื่องจากมีข้อดีกว่าระบบ Oxidation Ponds ตรงที่ใช้พื้นที่ดินน้อยกว่า และมีเสถียรภาพดีกว่าไม่ขึ้นกับสภาวะอากาศมากเหมือน Oxidation Ponds เมื่อเทียบกับระบบ Activated Sludge ถึงแม้ว่าระบบบ่อเติมอากาศจะใช้พื้นที่มากกว่า แต่ก็มีข้อดีเหนือระบบ Activated Sludge ตรงที่ควบคุมง่าย มีเสถียรภาพสูงกว่า เพราะมีค่า HRT สูง สามารถรับ Shock Hydraulic Load และ Shock BOD Load ได้ดี ไม่มีตะกอนส่วนเกินที่ต้องกำจัด และต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบได้ดีกว่า

WESTON and STACK (1960) เป็นผู้ริเริ่มในการใช้ระบบบ่อเติมอากาศ โดยได้ทดลองในห้องปฏิบัติการกำจัดน้ำทิ้งที่มีค่า BOD 225 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า HRT 2.5 วัน พบว่าสามารถกำจัด BOD ได้ 76 % เมื่อทดลองกำจัดน้ำทิ้งในขั้นโรงงานต้นแบบ (Pilot Plant) โดยใช้บ่อเติมอากาศขนาด 98,900 แกลลอน (375 ลูกบาศก์เมตร) พบว่าสามารถลดค่า BOD ได้ 55 % เมื่อใช้เวลาในการเติมอากาศ 3 วัน เมื่อเพิ่มเวลาในการเติมอากาศเป็น 4 วัน จะลดค่า BOD ได้ 68 % ข้อมูลที่ได้ทั้งหมดได้นำมาออกแบบระบบบ่อเติมอากาศ ซึ่งประกอบด้วยบ่อ 2 บ่อ สำหรับกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อกระดาษ ปรากฏว่าประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีเท่าที่ได้จากการทดลองเนื่องจากเริ่มเดินเครื่องระบบกำจัดในฤดูหนาว

หลังจากนั้นมา ระบบบ่อเติมอากาศได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน ผลการกำจัดน้ำทิ้งต่าง ๆ ด้วยระบบบ่อเติมอากาศได้ตีพิมพ์ในวารสารและรายงานทางวิชาการมากมาย ข้อมูลจาก

เอกสารอ้างอิงหลายฉบับได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 สำหรับในประเทศไทยนั้น ระบบบอเติมอากาศได้นำมาใช้เป็นครั้งแรกที่โรงงานบริษัทกระดาษไทยที่บ้านโป่ง ที่โรงพยาบาลอานันทมหิดล ลพบุรี และที่โรงงานน้ำตาลยานริมแม่น้ำแม่กลอง สำหรับโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งพบว่าระบบบอเติมอากาศ 3 บ่อเรียงกันแบบอนุกรม สามารถลดค่า BOD จาก 600 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบอเติมอากาศ

ชนิดของน้ำทิ้ง	ค่า BOD มก./ล. ก่อนกำจัด	หลังกำจัด	การลด BOD %	ความจุรวมของบอเติมอากาศ	เวลาในการกำจัด วัน	เอกสารอ้างอิง	หมายเหตุ
Pulp+Paper	200	16	92	259,000	8	Devones, et al (1968)	
	4000		83-95	20,800	5	Devones, et al (1968)	Two parallel
	490	69	86	124,900	11	Haynes (1968)	Four series
	375	50	87	80,800	6	Laing (1968)	Two series
	659	174	73.6	64,345	8	EPA (1970)	Two series
	659	231	65	64,345	8	EPA (1970)	Two parallel
Textile	350	35	90	13,250	5	Bartsch (1971)	Four series
Refinery	175	42	76		2.9	Stroud et al (1963)	Two series
Chemical	237	24	90	143	4.6	Ling (1963)	
Roofing	900	340	62		0.9	Loehr & McKinney (1966)	
Potato	855	72	92	60,600	16	Dutton & Fisher (1966)	
Paultry	900	30	96	19,500	14	Griffith (1968)	

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพการทำงานของบ่อเติมอากาศ (Eckenfelder, 1966)

ชนิดของน้ำทิ้ง	เวลาในการกำจัด วัน	อุณหภูมิ °F.	ค่า BOD มก./ล. ก่อนกำจัด	ค่า BOD มก./ล. หลังกำจัด	การลด BOD %	K_t ต่อวัน
Flax pulp	1	13-16	73	40	45	0.825
Kraft	4	20-36	252	89	64	0.458
	4	26-39	213	40	81	1.018
	3	26-40	193	52	73	0.904
News chip	10	17-30	378	122	68	0.21
Sewage	8.6	20	225	26	88	0.89
	9.6	13	307	47	84	0.64
	7.9	4	481	52	88	1.04
	7.3	9	328	86	73	0.39
	3.5	8	162	65	59	0.43
Paper board	5.7	26	415	33	92	2.03
	5.1	20	380	64	83	0.97
	3.2	24	432	86	80	1.26
Cannery	4.5	17.2	360	21	94	3.59
	4.5	6.3	920	490	43	0.195
	13.0	8.5	980	50	95	1.43

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบ่อเติมอากาศในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตอาหาร (Azad, 1976)

ชนิดของน้ำทิ้ง	ค่า BOD ก่อนการกำจัด, มิลลิกรัม/ลิตร	เวลาในการกำจัด, วัน	ประสิทธิภาพการกำจัด BOD, %
Beets	4,236	1.1	98
	3,830	0.75	96
Cannery	360	45 (17.2°C)	94
	980	13.0 (8.5°C)	95
	1,650 (COD)	2 - 5	50 - 80
Carrots	1,910	0.37	86
Peas	525 - 1,212	120	76 - 97
	970	0.39	94
	820	5.6	78
	1,100	0.6	60 - 70
Potatoes	1,000	82.0	97
Pumpkins	1,380	0.35	60
	1,380	6.0	88
	2,500	1.2	50 - 60
Tomatoes, Corn	580	5.0 (lab.)	71
	550	4.0 (")	61 - 70
	890	3.0 (")	60
	840	2.0 (")	59