

บทที่ 2

บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัฏจักรของน้ำ (Hydrologic Cycle)

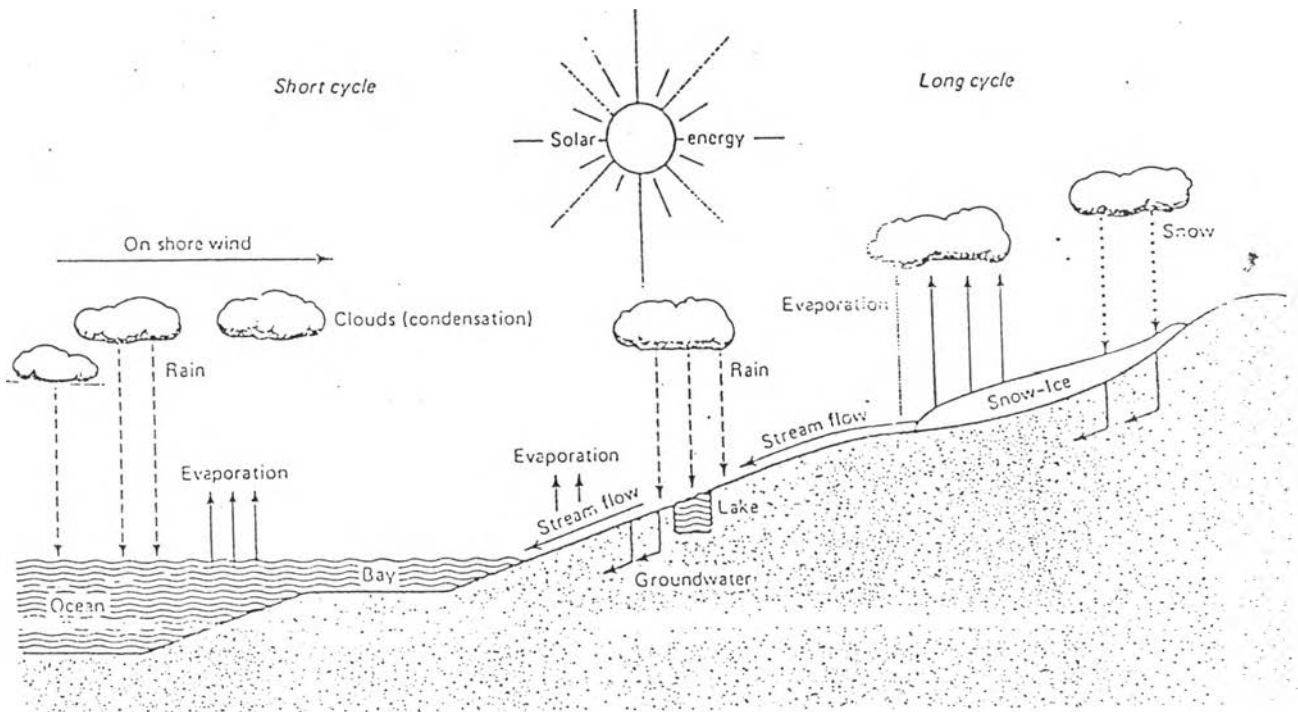
น้ำเป็นทรัพยากรที่มีการทดแทนตลอดเวลาโดยมีวัฏจักรของน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องกันตลอดเวลา ซึ่งน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ รวมทั้งบนผิวดินและจากการคายน้ำของพืชจะระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นสู่บรรยากาศโดยพลังงานแสงอาทิตย์ (Dunne และ Leopold, 1978) ซึ่งถ้าในอากาศมีไอน้ำมากจนถึงจุดอิ่มตัว ความแปรปรวนทางอุณหภูมิตามฤดูกาลของบรรยากาศรอบผิวโลกจะทำให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นละอองน้ำและรวมตัวกันเป็นหยดน้ำตกลงสู่ผิวโลกได้ในหลายรูปแบบ เรียกว่า น้ำฟ้าหรือน้ำจากอากาศ (precipitation) ซึ่งถ้าเป็นของเหลวก็คือ ฝน (rain) ถ้าเป็นรูปผลึกก็คือ หิมะ (snow) ถ้าเป็นรูปของน้ำแข็งก็คือ ลูกเห็บ (hail, sleet) และน้ำแข็ง (ice) นอกจากนั้นก็ยังมีรูปอื่น คือ น้ำค้าง (dew) หรือน้ำค้างแข็งตัว (frost) ในเมฆหนาว

น้ำฝนที่ตกลงมาสู่ผิวโลกนั้น ถ้าถูกพืชกักไว้บางส่วนตามใบหรือลำต้น เรียกว่า interception ซึ่งบางส่วนจะระเหยกลับสู่บรรยากาศและบางส่วนจะหยดลงสู่พื้นดิน หลังจากนั้นน้ำฝนที่ตกถึงพื้นดินจะเริ่มซึมลงดินด้วยแรงดึงดูดของเม็ดดินในลักษณะที่เรียกว่า การซึมสู่ผิวดินหรือการซึมผ่านผิวดิน (infiltration) และจะกลายเป็นน้ำที่ไหลในดิน เรียกว่า subsurface runoff ในกรณีที่ดินมีความชื้นเดิมน้อยมาก อัตราการซึมลงดินในลักษณะนี้จะสูงมากแต่เมื่อดินอิ่มตัวก็จะลดลงทันที ส่วนของน้ำที่ซึมลงไปอิ่มตัวอยู่ในดินจะถูกแรงดึงดูดโลกดูดให้ซึมลึกลงไปอีก เรียกว่า percolation ซึ่งจะซึมต่อไปถึงระดับน้ำใต้ดินที่มีน้ำอิ่มตัวซึ่งอยู่เป็นน้ำใต้ดิน เรียกว่า ground water น้ำใต้ดินนี้มีหลายระดับชั้น ซึ่งจะค่อย ๆ ไหลตามความลาดเทของชั้นดินไปสู่ที่ต่ำ อาจเป็นแหล่งขังน้ำใต้ดินอยู่หรืออาจไหลออกสู่แม่น้ำลำธารที่อยู่ระดับต่ำกว่าหรือออกสู่ทะเลโดยตรงก็มี แต่หากบางส่วนที่ซึมลงดินไปแล้วเกิดมีชั้นดินแน่นที่ขวางอยู่ น้ำส่วนนี้ก็จะมีไหลไปตามความลาดเทใต้ผิวดินและขนานไปกับชั้นดินแน่นที่บังกล่าว เรียกว่า interflow ซึ่งจะไหลออกสู่ผิวดินอีก เป็นลักษณะของน้ำซบค่อยไหลซึมออกไป น้ำที่ซึมลงดินตามชั้นตอนต่าง ๆ นั้นอาจถูกรากพืชดูดเอาไปปรุงอาหาร เลี้ยงลำต้นแล้วคายออกทางใบ เรียกว่า การคายน้ำ (transpiration)

น้ำฝนส่วนที่เหลือจากการซึมลงดินเมื่ออัตราของฝนที่ตกลงมามีค่าสูงกว่าอัตราการซึมลงดิน ก็จะเกิดการขังนองอยู่ตามพื้นดินแล้วรวมตัวกันไหลลงสู่ที่ต่ำ เรียกว่า overland flow บางส่วนอาจไปรวมตัวอยู่ในที่ลุ่มบริเวณเล็ก ๆ เรียกว่า surface storage แต่ส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมีปริมาณมากขึ้น มีแรงเซาะดินให้เป็นร่องน้ำ ลำธารและแม่น้ำตามลำดับ น้ำที่ไหลอยู่ในแม่น้ำลำธาร เรียกว่า น้ำท่า (surface runoff) น้ำท่านี้จะไหลลงสู่ทะเลและมหาสมุทรไปในที่สุด

ตลอดเวลาที่น้ำอยู่ในขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดการระเหยเรียกว่า evaporation คือ น้ำเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำขึ้นไปสู่บรรยากาศตลอดเวลา อาจเป็นจากผิวของใบไม้ที่ดักน้ำฝนไว้ จากผิวดินที่อึมด้วยน้ำ จากผิวน้ำในแม่น้ำ ลำธาร ทะเลสาป หนอง บึง อ่างเก็บน้ำ แต่ส่วนใหญ่ก็คือ จากทะเล มหาสมุทร เมื่อเป็นไอน้ำก็จะลอยสูงขึ้นไปและเมื่ออุณหภูมิลงก็จะกลั่นตัวเป็นละอองน้ำหรือหยดน้ำและจะกลายเป็นฝนตกลงมาอีก ซึ่งวัฏจักรของน้ำก็จะหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดเวลาไม่มีที่สิ้นสุด (วีระพล เต็มสมบัติ, 2528)

ลำธารและแม่น้ำ เป็นกระบวนการไหลกลับคืนสู่ทะเลหรือแหล่งของฝนที่ตกลงมาบนพื้นดินซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในวัฏจักรน้ำ ซึ่งลำธารและแม่น้ำเป็นแหล่งน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันในการนำน้ำมาใช้อุปโภค บริโภค กิจกรรมสันทนาการและเป็นแหล่งอาศัยของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยในด้านระบบของแม่น้ำทั้งในด้านศาสตร์ของแหล่งน้ำและในปัจจุบันมีงานวิจัยด้านคุณภาพน้ำมากขึ้นเนื่องจากปัจจุบันแหล่งน้ำเสื่อมโทรมลงมากต้องการการจัดการที่ถูกต้องเพื่อให้แหล่งน้ำมีคุณภาพดีขึ้น โดยในการวางแผนการจัดการคุณภาพน้ำจะต้องมีการศึกษาระบบการไหลของน้ำในแหล่งน้ำที่ศึกษา เพื่อวางมาตรการในการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรน้ำ

2.2 การไหลในทางน้ำเปิด

ทางน้ำเปิด เป็นทางน้ำใด ๆ ที่มีผิวอิสระของการไหลสัมผัสกับอากาศ เช่น การไหลของน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง โดยมีแบบในการไหลซึ่งกำหนดโดยการเปรียบเทียบอัตราการไหล ความเร็วหรือความลึกของไหล กับระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่ไปและเวลาที่เปลี่ยนไป ดังนี้

- การไหลแบบเสมอดันเสมอปลาย (uniform flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่จากหน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดถัดไป

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

- การไหลแบบไม่เสมอดันเสมอปลาย (non-uniform flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลเปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่จากหน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดถัดไป

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad (2.2)$$

- การไหลแบบทรงตัวมัน (steady flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลจากหน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดถัดไปไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

- การไหลแบบไม่ทรงตัวมัน (unsteady flow) จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลที่หน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดถัดไปมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad (2.4)$$

2.2.1. แรงที่เกี่ยวข้องกับการไหลในทางน้ำเปิด

- 1) แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งจะทำให้ น้ำไหลจากที่สูงลงที่ต่ำ
- 2) แรงเสียดทาน เป็นแรงที่ทำหน้าที่ต้านทานการไหล

ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการไหลตามอิทธิพลของแรงได้ ดังนี้

1.) อิทธิพลของความหนืดต่อการไหล เมื่อเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนืดกับแรงที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ สามารถแบ่งลักษณะการไหล ได้ 3 แบบ จากค่า R (Reynold number) ดังนี้

$$R = \frac{UL}{\nu} \quad (2.4)$$

โดย U = ความเร็วในการไหล
L = ความยาวอวลลักษณะ
 ν = kinematic viscosity

(1.) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นถ้าแรงเนื่องจากความหนืดมีค่าสูงมาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ การไหลจะเป็นลักษณะสม่ำเสมอและราบเรียบ โดย $R \leq 500$

(2.) การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) เกิดเมื่อความหนืดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่ทำให้เคลื่อนที่ อนุภาคน้ำจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โดยมีทางเดินที่ไม่ราบเรียบและไม่แน่นอน โดย $500 \leq R \leq 12,500$

(3.) การไหลแบบเปลี่ยนแปร (transitional flow) เป็นการไหลในช่วงระหว่างแบบราบเรียบและสับสน $12,500 \leq R$

2.) อิทธิพลของความหนาแน่นต่อการไหล เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามความลึกหรือลักษณะของของไหลทำให้มีผลให้การผสมกันอย่างรวดเร็วลดลง ในการไหลแบบ 2 ทิศทาง (two - dimensional flow) มักจะใช้ค่าของ Richardson number

$$R_i = \frac{g(\partial\rho/\partial y)}{\rho(\partial u/\partial y)^2} \quad (2.6)$$

โดย g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล
y = vertical coordinate
 $\partial u/\partial y$ = gradient of velocity in vertical direction
 $\partial\rho/\partial y$ = gradient of density in vertical direction

เมื่อ R_1 มาก แสดงว่า การไหลไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดมีการแบ่งชั้นของความหนาแน่น (stratified)

เมื่อ R_1 เข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่า การไหลเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous)

3.) อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลกต่อการไหล เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการไหลกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยสังเกตจากค่า Froude number สามารถแบ่งลักษณะการไหลเป็น 3 แบบ คือ

$$F = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2.7)$$

โดย U = ความเร็วในการไหล

L = ความยาวอัตลักษณ์

(1.) Critical flow เมื่อ $F = 1$ ซึ่งหมายถึงเกิดความสมดุลระหว่างความเร็วในการไหลและแรงโน้มถ่วงของโลก

(2.) Sub-critical flow เมื่อ $F < 1$ ซึ่งหมายความว่า การไหลเกิดจากแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นหลัก

(3.) Super-critical flow เมื่อ $F > 1$ ซึ่งหมายความว่า การไหลเกิดจากความเร็วในการไหลเป็นหลัก

2.2.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลในทางน้ำเปิด

1.) สมการต่อเนื่อง

Roberson , Cassidy และ Chaudhry (1988) กล่าวว่า สมการต่อเนื่องนี้มีพื้นฐานมาจากการประยุกต์กฎทรงมวลมาใช้ควบคุมปริมาตรของการไหลเข้าและออกของของไหล โดยสมการทรงมวล สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) = 0 \quad (2.8)$$

ซูเกียรติ ทรัพย์ไพศาลและไตรรัตน์ ศรีวัฒนา (2527) กล่าวว่า เมื่อพิจารณาการไหลแบบทรงตัว มันของของไหลผ่านท่อสายธาร เมื่อไม่มีของไหลผ่านด้านข้างของท่อสายธาร เพราะว่าสสารไม่มีการสูญหาย ดังนั้นของไหลที่ไหลเข้ามาหน้าตัดหนึ่งจะต้องเท่ากับของไหลที่ไหลออกจากหน้าตัดถัดไป

การเคลื่อนย้ายปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำหนดให้เป็น Q ดังนี้

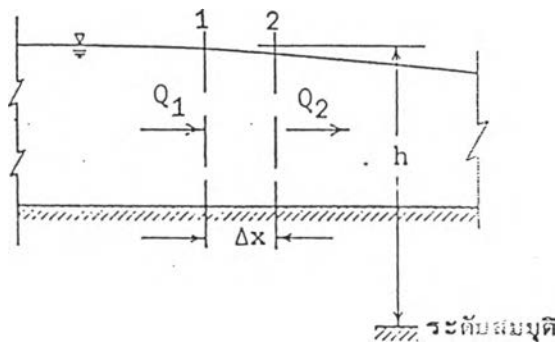
$$Q = AV \quad (2.9)$$

ดังนั้น สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$Q = V_1 A = V_2 A = V_n A \quad (2.10)$$

ถ้าเป็นการไหลแบบไม่ทรงตัว (unsteady flow) สมการความต่อเนื่องจะเป็น

$$Q_2 - Q_1 = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.2 แสดงอธิบายสมการต่อเนื่อง

ดังนั้น สมการความต่อเนื่องของการไหลแบบไม่ทรงตัวของการไหลในทางน้ำเปิด

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

โดยที่ Q = ปริมาณการไหลของน้ำ (m^3/s)

x = ระยะทางจากหน้าตัดหนึ่งไปหน้าตัดถัดไป (m)

h = ความสูงของระดับผิวน้ำ เมื่อเทียบกับระดับสมมุติ (m)

B = ความกว้างของผิวน้ำ (m)

2.) สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

สมการโมเมนตัม อธิบายได้ว่า แรงดล (impulse) ที่กระทำต่อวัตถุมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนโมเมนตัม (มวล x ความเร็ว)

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} \quad (2.13)$$

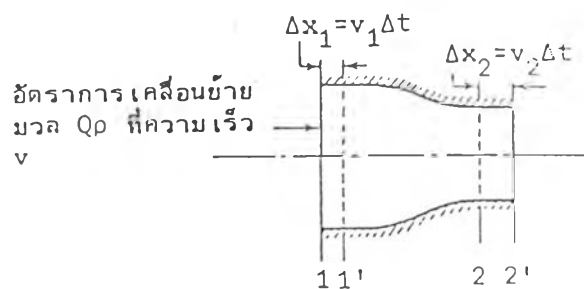
ดังนั้น

$$\int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt = \int_{v_1}^{v_2} m \cdot dV \quad (2.14)$$

$$F(t_2 - t_1) = m (V_2 - V_1) \quad (2.15)$$

$$F \Delta t = mV_2 - mV_1 \quad (2.16)$$

การที่จะนำหลักการของโมเมนตัมมาใช้ในการไหลของน้ำเป็นเรื่องยากเพราะน้ำมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นในการนำหลักการโมเมนตัมมาใช้ จึงสมมุติให้น้ำเป็นก้อนเดียวและถูกล้อมรอบด้วยท่อสายธาร



รูปที่ 2.3 แสดงการใช้สมการโมเมนตัมในการคำนวณการไหลของน้ำ

ในเวลา Δt เมื่อน้ำในหน้าตัด 1 และ 2 เคลื่อนที่ไปที่หน้าตัด 1' และ 2' ซึ่งจะสูญเสียโมเมนตัมไปเท่ากับมวลของไหลที่บรรจุอยู่ระหว่างหน้าตัด 1 และ 1' เคลื่อนที่ดังนี้

$$(\rho A_1 \Delta x_1) v_1 = (\rho A_1 v_1 \Delta t) v_1 \quad (2.17)$$

$$= \rho A_1 v_1^2 \Delta t \quad (2.18)$$

$$= (\rho Q v)_1 \Delta t \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกัน โมเมนตัมที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับ

$$(\rho A_2 \Delta x_2) v_2 = \rho A_2 v_2^2 \Delta t \quad (2.20)$$

$$= (\rho Q v)_2 \Delta t \quad (2.21)$$

$$\therefore \text{อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัม} = \frac{(\rho Q v)_2 \Delta t - (\rho Q v)_1 \Delta t}{\Delta t} \quad (2.22)$$

$$= (\rho Q v)_2 - (\rho Q v)_1 \quad (2.23)$$

ดังนั้น $\sum F = (\rho Q v)_2 - (\rho Q v)_1$ ใช้ในกรณีการไหลแบบทรงตัวมัน

ถ้าเป็นการไหลแบบไม่ทรงตัว แสดงเป็นสมการดังนี้

$$\sum \frac{F}{\Delta x} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) + \frac{(\rho A v^2)_2 - (\rho A v^2)_1}{\Delta x} \quad (2.24)$$

ในกรณีของการคำนวณการไหลซึ่งเป็นแบบเปลี่ยนแปรที่ละน้อยและไม่ทรงตัว (Gradually varied unsteady flow) ที่มักเกิดขึ้นในการไหลของแม่น้ำทั่วไป ดังแสดงดังนี้

1.) สมการต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial y}{\partial t} + y \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (2.25)$$

หรือ

$$T \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial(Av)}{\partial x} = 0 \quad (2.26)$$

2.) สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_x - S_f) = 0 \quad (2.27)$$

หรือ

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_x = 0 \quad (2.28)$$

| | | | |
|--------|----------------|---|------------------------------------|
| โดยที่ | v | = | ความเร็วในการไหล |
| | y | = | ความลึกการไหล |
| | A | = | พื้นที่การไหล |
| | S _x | = | ความชันของท้องน้ำ |
| | g | = | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก |
| | S _f | = | friction slope |
| | T | = | top width |
| | x | = | longitudinal coordinate |

สมการข้างต้นอยู่ในรูปของ complete dynamic model เมื่อเปลี่ยนสมการ (2.26) ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลโดยตรงกับความลึกการไหล

$$Q = \Gamma A R^m \sqrt{S_f} \quad (2.29)$$

| | | | |
|--------|---|---|-------------------------|
| โดยที่ | Γ | = | สัมประสิทธิ์ความต้านทาน |
| | R | = | รัศมีชลศาสตร์ |
| | m | = | empirical exponent |

ในการไหลแบบไม่ทรงตัว (unsteady flow) ค่า S_f จะแปรผันกับความชันของคลื่นและความลึกของการไหล และในกรณีที่การไหลเป็นแบบทรงตัวมัน ปริมาณการไหลโดยทั่วไปจะแสดงดังนี้

$$Q = Q_N = \Gamma AR^m \sqrt{S_x} \quad (2.30)$$

$$\Gamma AR^m = \frac{Q_N}{\sqrt{S_x}} \quad (2.31)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.29) ด้วยสมการ (2.31)

$$Q = Q_N \sqrt{\frac{S_f}{S_x}} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.28)

$$S_f = S_x - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} \quad (2.33)$$

แทนค่าสมการที่ (2.32) ด้วยค่า S_f

$$Q = Q_N \left(1 - \frac{1}{s_x} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{S_0 g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{S_0 g} \frac{\partial v}{\partial t} \right)^{1/2} \quad (2.34)$$

kinematic wave ————|
diffusive analogy ————|
complete dynamic ————|

ซึ่ง kinematic wave เป็นสภาพการไหลที่เปรียบเทียบเฉพาะแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงเสียดทาน (French, 1986) และ kinematic model นี้จะใช้สมการต่อเนื่องและสมการทรงตัวมัน โดยมีสมมติฐานว่า ปริมาณการไหลเท่ากับปริมาณการไหลปกติ

$$\frac{1}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2.35}$$

โดยที่ C = kinematic wave speed

diffusive analogy ใช้สมการโมเมนตัมมาใช้ โดยมีสมมติฐานว่า ในสมการโมเมนตัมปริมาณการไหลมีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับ ความดัน แรงเสียดทานและแรงโน้มถ่วงของโลก

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \tag{2.36}$$

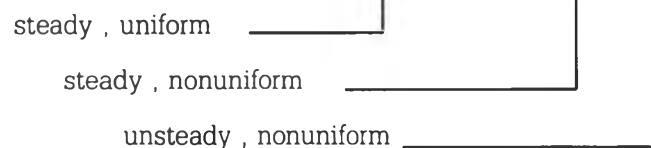
โดยที่ C = coefficient responsible for the translation characteristic of the wave

D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

complete dynamic เป็นการรวมสมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมไว้ด้วยกัน ทำให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำในแบบการไหลที่ไม่ทรงตัว โดยสมการที่เป็นผลรวมของ 2 สมการนี้ คือ Saint Venant equation โดยมีสมมติฐานสำหรับใช้ในลำน้ำที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Roberson , Cassidy และ Chaudhry,1988)

$$\frac{\partial}{\partial t}(AV) + \frac{\partial}{\partial x}(AV)^2 + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_x - S_f) \tag{2.37}$$

โดยที่
$$S_f = S_x - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$$



ในการคำนวณทางชลศาสตร์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเสมอซึ่งจากสมการหรือหลักการดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าความเร็วในการไหลก็เป็นสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการคำนวณ

2.2.3 สูตรที่ใช้คำนวณความเร็วในการไหล

สูตรที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการคำนวณความเร็วในการไหล โดยทั่วไปมี 2 สูตร ดังนี้

1) สูตรของเชซี (The Chezy formula) เสนอโดย Antoine Chezy (1769)

$$V = C\sqrt{RS} \quad (2.38)$$

ดังนั้น
$$Q = AC\sqrt{RS} \quad (2.39)$$

2) สูตรของแมนนิง (The Manning' formula) เสนอโดย Robert Manning (1889)

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2.40)$$

| | | | |
|--------|---|---|--|
| โดยที่ | V | = | ความเร็วเฉลี่ยการไหล (เมตร/วินาที) |
| | R | = | รัศมีชลศาสตร์ (เมตร) |
| | S | = | ความลาดของเส้นพลังงาน |
| | A | = | พื้นที่หน้าตัดลำน้ำ (เมตร ²) |
| | Q | = | ปริมาณการไหล (เมตร ³ /วินาที) |
| | n | = | สัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิง |
| | C | = | สัมประสิทธิ์ความขรุขระของเชซี |

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิง (ซูเกียร์ติ ทรัพย์ไพศาล และ ไตรรัตน์ ศรีวัฒนา , 2527)

- 1.) ความขรุขระผิวหน้าทางน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของวัสดุที่นำมาใช้สร้างผิวหน้าทางน้ำ โดยวัสดุที่มีเม็ดละเอียดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิง (n) ต่ำและวัสดุที่มีเม็ดหยาบจะให้ค่า n สูง
- 2.) พืชที่ปกคลุมทางน้ำ จะมีผลในการลดอัตราการไหล
- 3.) ความสม่ำเสมอของทางน้ำ ในทางน้ำธรรมชาติ ความไม่สม่ำเสมอของทางน้ำจะเกิดขึ้นจาก กรวด หวาย หลุมและบ่อในท้องคลอง ถ้าทางน้ำนั้นค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือหน้าตัดการไหล จะไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิงมากนัก แต่ถ้าการเปลี่ยนนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันก็จะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิงอย่างมาก

4.) แนวทางน้ำ ทางน้ำที่มีรัศมีส่วนโค้งของแนวทางน้ำมากและส่วนโค้งนั้นราบเรียบ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก

5.) การกัดเซาะและตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนจะทำให้ทางน้ำที่ไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนมาเป็นเสมอด้านเสมอปลายและค่าของสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งจะลดลง ในทางตรงกันข้าม ถ้าเกิดการกัดเซาะก็จะทำให้ทางน้ำไม่สม่ำเสมอและค่าของสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งเพิ่มขึ้น

6.) สิ่งกีดขวาง สิ่งกีดขวางทางน้ำ เช่น ตอหม้อสะพาน จะทำให้สัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นและการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด รูปร่าง ปริมาณและจัดวางตัวของสิ่งกีดขวาง

7.) ความลึกการไหลและอัตราการไหล โดยทั่วไปทางน้ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งลดลงเมื่อความลึกการไหลและอัตราการไหลมีค่ามากขึ้น ในทางน้ำที่สร้างขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่งจะมีค่าคงเดิมไม่ว่าความลึกการไหลจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

8.) ฤดูกาลที่เปลี่ยนไป เมื่อฤดูกาลเปลี่ยนแปลงพืชน้ำที่ขึ้นอยู่ในทางน้ำธรรมชาติจะเจริญเติบโตหรือตาย ดังนั้น n จึงเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาลที่เปลี่ยนไป

9.) วัสดุแขวนลอย เมื่อมีวัสดุแขวนลอยอยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่งจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการไหลมากขึ้น นั่นคือ ทางน้ำมีความขรุขระเพิ่มขึ้น

จากการนำหลักการต่าง ๆ ในการคำนวณการไหลรวมถึงปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณการไหลของน้ำ ทำให้สามารถอธิบายการไหลของน้ำในแม่น้ำได้ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณการเคลื่อนย้ายมวลสารในลำน้ำและคุณภาพน้ำต่าง ๆ ได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิง (Manning'n)

| ผิวทางน้ำเปิด | n |
|--|-------|
| 1.) ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (natural channels) | |
| - เรียบและตรง | 0.030 |
| - ไหลช้าเนื่องจากมีสระลึกเป็นช่วง ๆ | 0.040 |
| - แม่น้ำสายหลัก | 0.035 |
| 2.) ลุ่มแม่น้ำที่มีน้ำท่วมถึง (flood plains) | |
| - ทุ่งหญ้า | 0.035 |
| - ไม้พุ่มเตี้ยบาง ๆ | 0.050 |
| - ไม้พุ่มเตี้ยมาก | 0.075 |
| - ต้นไม้ | 0.150 |
| 3.) ทางน้ำเปิดดินขุด (excavated earth channels) | |
| - เรียบ | 0.022 |
| - มีกรวดบ้าง | 0.025 |
| - เต็มไปด้วยหญ้า | 0.030 |
| - ก้อนหิน | 0.035 |
| 4.) ทางน้ำเปิดลาดผิว (artificially lined channels) | |
| - แก้ว | 0.010 |
| - ทองเหลือง | 0.011 |
| - เหล็กเรียบ | 0.012 |
| - เหล็กทาสี | 0.014 |
| - เหล็กมีหมุดย้า | 0.015 |
| - เหล็กหล่อ | 0.013 |
| - คอนกรีตขัดผิว | 0.012 |
| - คอนกรีตผิวหยาบ | 0.014 |
| - ไม้ไผ่เรียบ | 0.012 |
| - ไม้ไม่ได้ใส | 0.013 |
| - ดินเหนียว | 0.014 |
| - ก่ออิฐ | 0.015 |
| - แอสฟัลต์ | 0.016 |
| - โลหะลูกฟูก | 0.022 |
| - หินเรียง | 0.025 |

ที่มา : Bruce (1990)

2.3 คุณภาพน้ำในแม่น้ำ (River water quality)

Thomann และ Mueller (1987) กล่าวว่า สารประกอบทั่วไปแบ่งตามลักษณะการคงตัวของสารเป็น 2 ประเภท คือ

1.) conservative substance เป็นสารที่ไม่มีการสูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิต หรือการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายของสารแม้ว่าเวลาผ่านไปเป็นเวลานาน เช่น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด คลอไรด์และโลหะหนักบางชนิด

ดังนั้นการคำนวณของสารประกอบที่ไม่มีการย่อยสลายในลำน้ำ จึงใช้เพียงสมการของการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายเท่านั้น

2.) Non conservative substance เป็นสารที่มีการย่อยสลายตามเวลาเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี และการย่อยสลายโดยแบคทีเรียหรือแสงอาทิตย์

ดังนั้นในการคำนวณมักมีสมมติฐานว่า ในการตายหรือย่อยสลายจะใช้ first order reaction คือ อัตราการลดลงของสารตามเวลา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการโดยใช้ mass balance Equation (O'Connor, 1967) ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (2.41)$$

| | | | |
|--------|---|---|------------------------------------|
| โดยที่ | C | = | ความเข้มข้นของสาร (มิลลิกรัม/ลิตร) |
| | K | = | ค่าคงที่การย่อยสลาย (1/วัน) |
| | t | = | เวลา (วินาที) |

ในกรณีของสารที่มีการย่อยสลายส่วนมากนั้นยังมีปฏิกิริยาอื่น ๆ นอกจากกระบวนการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายมลสารเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีผลให้สารนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพเคมีและชีววิทยา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์นั้นก็ควรนำมาคำนวณร่วมด้วย เช่น ออกซิเจนละลายและบีโอดี เป็นต้น

2.3.1 การเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายของมลสาร

Techbanoglous และ Schroeder (1987) กล่าวว่า ในการคำนวณความเข้มข้นของสารในลำน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนย้ายและการแพร่กระจายของสารในลำน้ำ (Advection and Dispersion) โดยอากาศและน้ำรวมถึงคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารซึ่งไม่มีปฏิกิริยาอื่นเกี่ยวข้อง ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของมลสารแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

1.) Advection - โดยสารจะเคลื่อนที่ตามความเร็วของน้ำที่ผ่านตัวกลาง
สมการแสดงการเคลื่อนที่ของสารซึ่งเกิดจากการพาหรือการเคลื่อนย้ายนั้น แสดงดังนี้

$$= \alpha \bar{V}_x A_x C \quad (2.42)$$

หรือ

$$= \bar{V}_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.43)$$

โดยที่ α = ความโปร่งของตัวกลาง (เท่ากับ 1 สำหรับน้ำ)
 \bar{V}_x = ความเร็วเฉลี่ยในทิศทาง x (เมตร/วินาที)
 A_x = พื้นที่หน้าตัดลำน้ำในทิศทาง x (เมตร) ความลาดของเส้น
 พลังงาน
 C = ความเข้มข้นของสาร (กรัม/เมตร³)

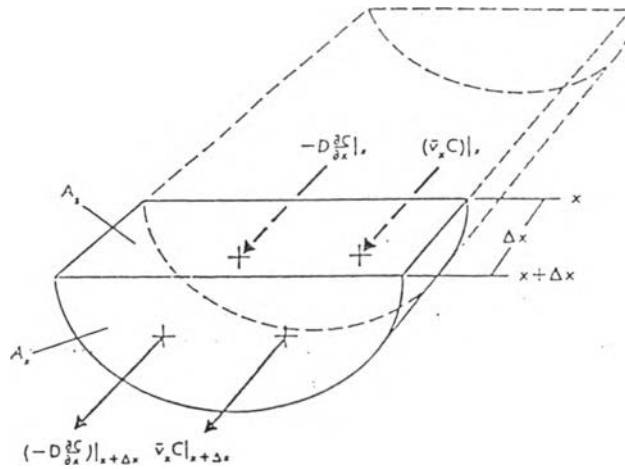
2.) Dispersion โดยสารจะเคลื่อนที่โดยการแพร่กระจายของสารจากที่ ๆ มีความเข้มข้นสูงไปที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังแสดงสมการแสดงความเข้มข้นในทิศทางเดียว ดังนี้

$$= -\alpha D_x A_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.44)$$

หรือ

$$= D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.45)$$

โดยที่ D_x = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในทิศทาง x
 $\frac{\partial C}{\partial x}$ = ความเข้มข้นในทิศทาง x (กรัม²/เมตร³.วินาที)



รูปที่ 2.4 อธิบายถึงการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายของมลสารโดยใช้สมการทิศทางเดียว (one-dimensional Equation) โดย Tehobanoglous และ Schroeder (1987)

ดังนั้นในการคำนวณปฏิกิริยาที่มีผลต่อการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารทั้งที่เป็นสารคงตัวหรือสารที่ไม่คงตัว โดยใช้คุณสมบัติของการเคลื่อนย้ายของสาร รวมถึงการย่อยสลายชั้นแรกของสารในลำน้ำ โดยใช้สมการแบบทิศทางเดียว (one dimensional equation) สำหรับสภาวะที่มีการไหลแบบทรงตัว Locks, Stedingen และ Haith (1981) เสนอสมการไว้ ดังนี้

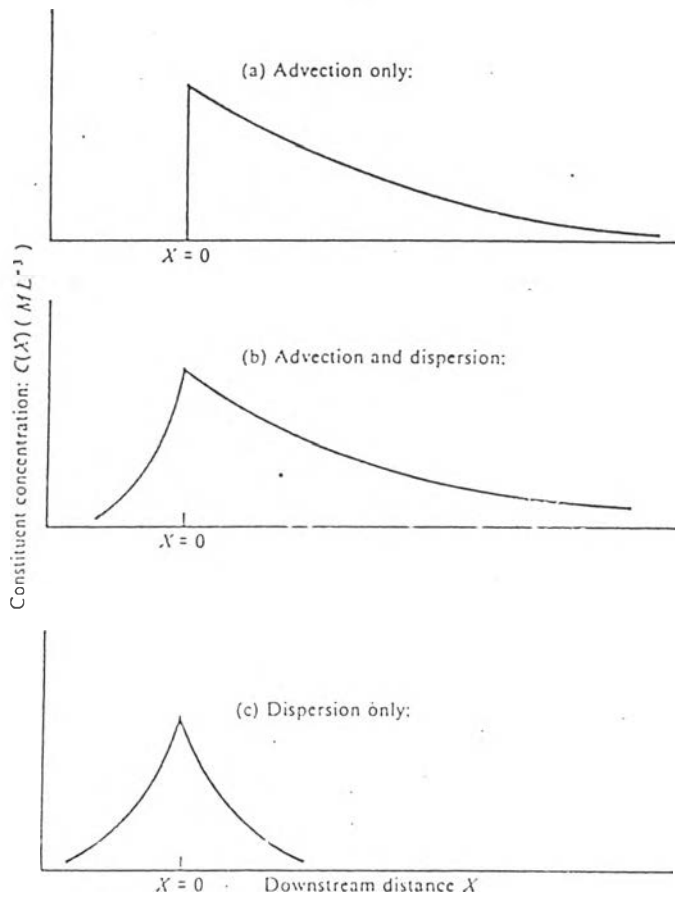
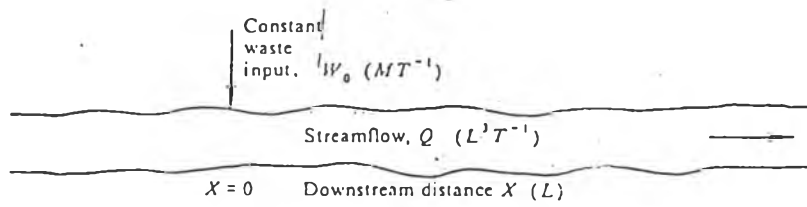
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x V C)}{A_x \partial x} - \frac{dC}{dt} \tag{2.46}$$

หรือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - KC = 0 \tag{2.47}$$

- โดยที่ K = สัมประสิทธิ์การย่อยสลาย
 V = ความเร็วเฉลี่ยของลำน้ำ (เมตร/วินาที)
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (เมตร²/วินาที)

- A_x = พื้นที่หน้าตัดลำน้ำ (เมตร²)
- C = ความเข้มข้นของสาร (มิลลิกรัม/ลิตร)
- $\frac{dC}{dt}$ = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลาย เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายของมลสารที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำ (Lock , Steđingen และ Haith ,1981)

ซึ่ง Fischer et al (1979) ได้เสนอสมการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายตามความยาวของลำน้ำ ดังนี้

$$D_x = \frac{0.011V^2W^2}{HU^*} \quad (2.48)$$

| | | | |
|--------|-------|---|--|
| โดยที่ | D_x | = | สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายตามความยาว (ฟุต ² /วินาที) |
| | V | = | ความเร็วเฉลี่ยของลำน้ำ (ฟุต/วินาที) |
| | W | = | ความกว้างของลำน้ำ (ฟุต) |
| | H | = | ความลึกของลำน้ำ (ฟุต) |
| ซึ่ง | U^* | = | \sqrt{gHs} |
| | g | = | ความเร่งโน้มถ่วง (ฟุต/วินาที ²) |
| | S | = | ความชันของลำน้ำ |

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในลำน้ำ

| River | H (m) | W (m) | U (m/sec) | U' (m/sec) | D _L (m ² /sec) | References |
|-------------------|----------|----------|--------------|---------------|---|---------------------------|
| Missouri River | 2.70 | 200 | 1.55 | 0.074 | 5290.8 | Yotsukura et al. |
| Clinch River | 0.85 | 47 | 0.32 | 0.067 | 43.7 | (1970) |
| Tennessee | 2.10 | 60 | 0.94 | 0.104 | 100.2 | Godfrey and |
| | 2.10 | 53 | 0.83 | 0.107 | 94.7 | Frederick (1970) |
| Bayou Anacoco | 0.94 | 26 | 0.34 | 0.067 | 13.6 | (predicted D _x |
| | 0.91 | 37 | 0.40 | 0.067 | 39.5 | From Fischer, |
| Nooksack River | 0.76 | 64 | 0.67 | 0.27 | 98.6 | 1968) |
| Wind/Bighom River | 1.10 | 59 | 0.88 | 0.12 | 224.6 | McQuivey and |
| | 2.16 | 69 | 1.55 | 0.17 | 342.7 | Keefer (1974) |
| John Day River | 0.58 | 25 | 1.01 | 0.14 | 86.4 | (predicted D _x |
| | 2.47 | 34 | 0.82 | 0.18 | 23.5 | from |
| Comite River | 0.43 | 16 | 0.37 | 0.05 | 17.9 | Fischer,1975) |
| Sabine River | 2.04 | 104 | 0.58 | 0.05 | 392.4 | |
| | 4.75 | 127 | 0.64 | 0.08 | 191.2 | |
| Yadkin River | 2.35 | 70 | 0.43 | 0.10 | 42.4 | |
| | 3.84 | 72 | 0.70 | 0.13 | 66.0 | |

ที่มา : Fischer et al (1979)

2.3.2 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ (Water quality parameter)

1.) ออกซิเจนละลาย (Dissolve Oxygen ; DO)

ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ไม่มีสี กลิ่นและรส ซึ่งสามารถละลายอยู่ในน้ำได้ในปริมาณจำกัด (Andrew , Moore และ Leroy ,1972) ออกซิเจนมีความสำคัญมากต่อแหล่งน้ำ เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวควบคุมกระบวนการใช้พลังงานของแหล่งน้ำ ไม่ว่าพืชหรือสัตว์ก็ต้องการออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายจึงใช้เป็นเครื่องมือชี้คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำได้อีกด้วย (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2534) โดยทั่วไป ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำสำหรับสิ่งมีชีวิตจะต้องไม่น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

แหล่งน้ำได้รับออกซิเจนปริมาณมากจากอากาศ การสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำ แต่ถ้าออกซิเจนถูกใช้ในการหายใจและการย่อยสลายของผู้ย่อยสลายมีปริมาณมากกว่าการผลิตออกซิเจนจะทำให้เกิดภาวะการขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะถ้าเป็นการย่อยสลายมักจะขาดออกซิเจน เนื่องจากมักจะเกิดกระบวนการย่อยสลายของพื้นท้องน้ำ (benthic zone) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่มีแสงลงไปถึง ดังนั้นจึงไม่เกิดการสังเคราะห์แสง ส่วนถ้าอาศัยการเคลื่อนที่ของออกซิเจนจากผิวน้ำลงมาสู่พื้นน้ำ ซึ่งมักใช้เวลานานในการละลายมาถึงพื้นท้องน้ำ ดังนั้นจึงเกิดการขาดออกซิเจนได้

(1.) ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Andrew , Moore และ Leroy,1972)

(1.1) อุณหภูมิ โดยปริมาณการละลายของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลง

(1.2) ปริมาณสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้ามีสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้เป็นจำนวนมากจะช่วยให้สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ

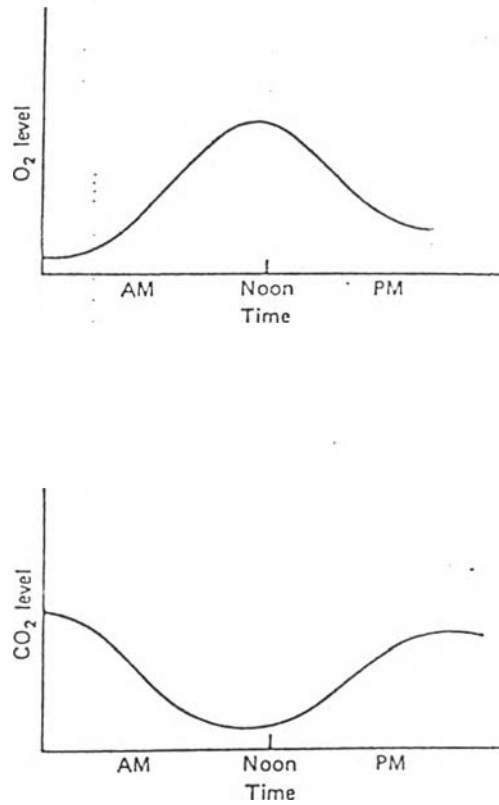
(1.3) ความเข้มแสงที่ผ่านลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับความลึกและความขุ่นของน้ำ ถ้าแหล่งน้ำมีความลึกและความขุ่นของน้ำมากจะทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านลงสู่พื้นได้ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงทำให้สังเคราะห์แสงได้น้อยลงมีผลทำให้ออกซิเจนละลายน้ำน้อยลงเช่นกัน

(1.4) ความแรงในการไหลของน้ำ ถ้ามีความเร็วในการไหลมากก็สามารถช่วยเติมออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำได้

(1.5) ปริมาณของสารอินทรีย์ที่จะถูกย่อยสลายในน้ำ ถ้ามีสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำมากทำให้ผู้ย่อยสลายต้องใช้ ออกซิเจนในการย่อยสลายมากขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง

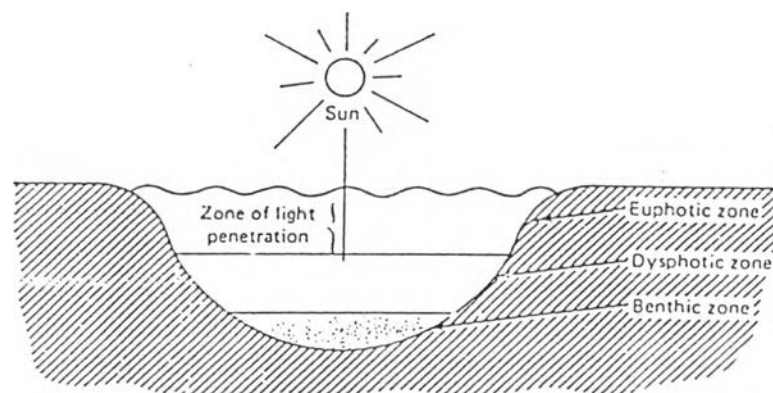
(2) กระบวนการของสิ่งมีชีวิตในน้ำที่มีผลต่อปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำ (Thomann และ Mueller , 1987)

(2.1) กระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) โดยพืชต้องการวัตถุดิบในการสังเคราะห์แสง คือ แหล่งของสารอินทรีย์ (ฟอสเฟต ไนเตรตและคาร์บอนไดออกไซด์) สำหรับการเจริญเติบโตของพืชและแสงอาทิตย์เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบดังกล่าวเป็นรูปที่ผู้บริโภคสามารถนำมาใช้ได้ ในระหว่างที่กระบวนการนี้เกิดขึ้นออกซิเจนจะถูกผลิตขึ้นและปล่อยออกสู่ระบบเพื่อใช้ในการหายใจ



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของแสงอาทิตย์กับปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

ตั้งแต่แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการนี้ Black (1977) สามารถแบ่งขอบเขตของน้ำตามความลึกและการส่องผ่านของแสงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงชั้นความลึกของน้ำที่แสงส่องผ่าน

โดยชั้นบนสุดเป็นชั้นที่มีการส่องผ่านของแสง เรียกว่า euphotic zone ชั้นต่อมา คือ ชั้นที่มีความมืด เรียกว่า dysphotic zone ซึ่งอยู่ระหว่างชั้นบนสุด คือ euphotic zone และชั้นล่างสุด คือ benthic zone ซึ่งชั้นนี้เป็นพื้นน้ำในส่วนของตะกอนซึ่งในแม่น้ำ ทะเลสาบหรือลำธารที่มีลักษณะตื้นมักจะไม่มี dysphotic zone เนื่องจากแหล่งน้ำที่ตื้นนั้นแสงสามารถส่องผ่านถึงชั้นของ benthic zone ในทางเดียวกัน ตำแหน่งของชั้น euphotic และ dysphotic zone ในแหล่งน้ำที่มีความลึกชั้นทั้ง 2 นี้จะยกขึ้น เช่น ระหว่างช่วงที่มีฝนตกหนัก เมื่อมีการชะล้างของตะกอนลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้น้ำขุ่นไปด้วยตะกอนแขวนลอย ซึ่งจะกั้นแสงแดด ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ลดขอบเขตของชั้น euphotic zone ลงและเพิ่มขอบเขตของ dysphotic zone ให้สูงขึ้น

ในกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชจะนำคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมถึงสารอาหารที่จำเป็นมาผ่านปฏิกิริยาทางชีวเคมีจนได้ผลผลิต คือ คาร์โบไฮเดรต ออกซิเจนและน้ำ ดังแสดงดังสมการ



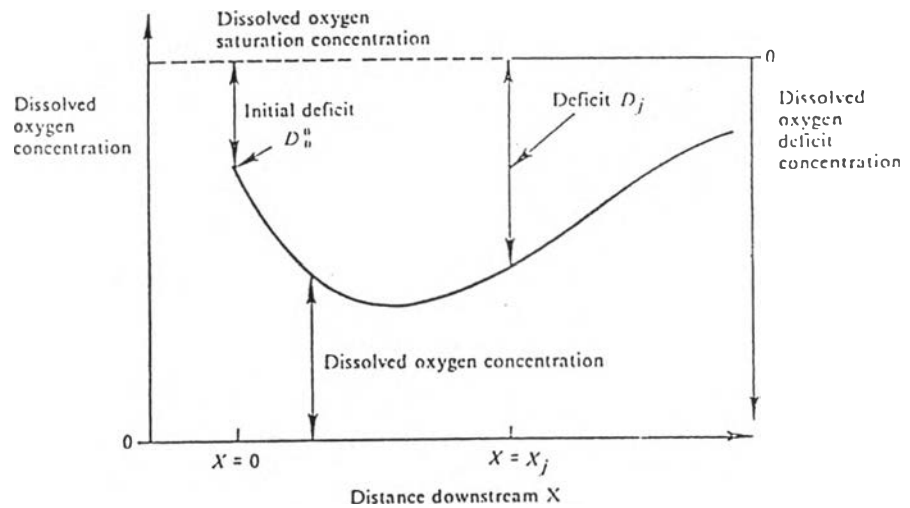
ในระบบของน้ำ ไอ้และออกซิเจนจะละลายน้ำอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่โมเลกุลของน้ำที่จับกันระหว่าง Hydrogen bond กับออกซิเจนมารวมกันเป็นโมเลกุลของน้ำในกระบวนการสังเคราะห์แสง

(2.2) กระบวนการหายใจ (Respiration) เป็นกระบวนการที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เพื่อการเจริญเติบโต การซ่อมแซมส่วนที่ขาดหายไป ซึ่งกระบวนการหายใจนี้เป็นส่วนกลับของการสังเคราะห์แสง โดยมีสมการดังนี้



(3.) สมดุลย์ของออกซิเจนในแหล่งน้ำธรรมชาติ

Wastes (1984) กล่าวว่า เมื่อมีการปล่อยสารอินทรีย์ลงแหล่งน้ำ ออกซิเจนจะถูกใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย ดังนั้นในการคาดการณ์การใช้ออกซิเจนหรือความเข้มข้นของออกซิเจนในแหล่งน้ำ จึงต้องพิจารณาทั้งการเติมออกซิเจนและการใช้ออกซิเจนจากกระบวนการทางชีวเคมี โดยแบบจำลองพื้นฐานที่ใช้พัฒนามาจาก Steeter และ Phelps (1925) ซึ่งเป็นแบบจำลองแรกที่สามารถคาดการณ์ปริมาณออกซิเจนละลายในแม่น้ำ Ohio เรียกแบบจำลองนี้ว่า "Oxygen Sag Curve" หรือ "DO Sag Model" ซึ่งรวมเฉพาะออกซิเจนที่ใช้ในการกระบวนการย่อยสลายทางชีวเคมีและการเพิ่มของออกซิเจนทางกายภาพเท่านั้น



รูปที่ 2.8 แสดงผลของ Dissolved Oxygen sag curve จากจุดปล่อยน้ำทิ้ง $X = 0$ (Loocks, Stedinger และ Haith, 1981)

เมื่อมีการคำนวณการลดลงของออกซิเจนจากจุดปล่อยน้ำทิ้ง สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$R_1 = K_2 (C_s - C) \quad (2.49)$$

| | | | |
|--------|-------|---|---|
| โดยที่ | R_1 | = | อัตราการเติมอากาศ (มิลลิกรัม/ลิตร) |
| | K_2 | = | สัมประสิทธิ์การเติมอากาศ |
| | C_s | = | ปริมาณออกซิเจนที่จุดอิ่มตัวในน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร) |
| | C | = | ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร) |

(4.) สัมประสิทธิ์การเติมอากาศ ในแบบจำลองของออกซิเจนในแม่น้ำกระบวนกรเติมอากาศนี้ใช้อธิบายการดูดกลืนออกซิเจนจากอากาศ โดยอัตราการเติมอากาศเป็นสัดส่วนกับการขาดออกซิเจนในลำน้ำ (Techobanoglous และ Schroeder, 1987)

Thomann และ Mueller, 1987 กล่าวว่า สมการที่นิยมใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การเติมอากาศ ได้แก่

(4.1) O' Connor - Dubbins (1958) ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้ทั่วไป โดยส่วนใหญ่ใช้กับแม่น้ำที่มีความลึกเฉลี่ย 1 - 30 ฟุต และความเร็วในการไหลอยู่ในช่วง 0.5 - 1.6 ฟุต/วินาที

$$K_2 = \frac{(12.9V)^{1/2}}{H^{3/2}} \quad (2.50)$$

โดยที่ V = ความเร็วเฉลี่ยของลำน้ำ (ฟุต/วินาที)
H = ความลึกเฉลี่ยของลำน้ำ (ฟุต)

(4.2) Churchill (1962) ใช้กับลำน้ำที่มีความลึกอยู่ในช่วง 2 - 11 ฟุต แต่ความเร็วในการไหลอยู่ในช่วง 1.8 - 5 ฟุต/วินาที ซึ่งใช้กับแม่น้ำที่มีความเร็วในการไหลสูง

$$K_2 = \frac{11.6V}{H^{1.67}} \quad (2.51)$$

(4.3) Own et al. (1964) ใช้กับลำน้ำที่มีความลึกเฉลี่ย 0.4 - 11.0 ฟุต และมีความเร็วเฉลี่ย 0.1 - 5.0 ฟุต/วินาที

$$K_2 = \frac{21.6V^{0.67}}{H^{1.85}} \quad (2.52)$$

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าคงที่ของการเติมอากาศ (Reaeration constant ; K_2) ของลำน้ำ

| Water body | Range of K_2 at 20°C (base e) , d ⁻¹ |
|----------------------------------|--|
| Small Ponds and back waters | 0.10 - 0.23 |
| Sluggis streams and Large lake | 0.23 - 0.35 |
| Large streams of low velocity | 0.35 - 0.46 |
| Large streams of normal velocity | 0.46 - 0.69 |
| Swift Streams | 0.69 - 1.15 |
| Rapids and Waterfalls | > 1.15 |

ที่มา : Tehobanoglous และ Schroeder (1987)

ต่อมาเมื่อมีการพิจารณาถึงการเพิ่มของออกซิเจนละลายเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและการลดลงของออกซิเจน จากกระบวนการหายใจและการนำออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ตามหลักของ Streeters และ Phelps (1925) สามารถเขียนสมการรวมการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย โดยสมการ mass balance ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C_s - C) - K_1L - S_r \quad (2.53)$$

| | | | |
|--------|-------|---|---|
| โดยที่ | K_1 | = | ค่าคงที่การใช้ออกซิเจน (1/ชั่วโมง) |
| | L | = | ค่าออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อเวลาผ่านไป t (มิลลิกรัม/ลิตร) |
| | S_r | = | อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนเนื่องมาจาก กระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจ |

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำนอกจากจะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมอากาศ กระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจของพืชและสัตว์แล้ว อีกกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ การใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงและใช้ไปในการหายใจในแม่น้ำ

| River | T °C | Pm g/m ² -day | Pav g/m ² -day | R g/m ² -day | Reference |
|--------------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Grand, Michigan | 28 | 12.7-37.6 | 4.4-13.0 | 9.3-12.7 ^a | O'Conner and Di Toro (1970) |
| Clinton, Michigan | 21 | 13.2-22.6 | 4.2-7.3 | 9.3 ^a | O'Conner and Di Toro (1970) |
| Cruckee, Nevada | 28 | 12.9-26.0 | 4.8-9.6 | 3.6-6.2 ^a | O'Conner and Di Toro (1970) |
| Vel, Great Britain | 16 | 24 | 9.0 | 4.6 ^a | O'Conner and Di Toro (1970) |
| Clint, Michigan | 28 | 4.0-40.0 | 1.3-18 | 4-20 ^a | O'Conner and Di Toro (1970) |
| North Carolina streams | - | - | 9.8 | 21.5 ^b | Thomas and O'Connell(1966) |
| Laboratory Streams | - | - | 3.4-4.0 | 2.4-2.9 ^b | Thomas and O'Connell(1966) |
| Charles, Massachusetts | 19-25 | - | 0.0-12.0 | 0.0-36 ^b | Erdmann (1979a,b) |
| Shenandoah, Virginia | 23 | 4.8-17.4 | - | 0.9-5.9 ^a | Deb and Bowers (1983) |
| Baker, Virginia | - | - | 0.45 | 1.9 ^b | Kelly et al. (1975) |
| Rappahannock, | - | - | 6.1 | 7.3 ^b | Kelly et al. (1975) |
| Virginia | - | - | 2.1 | 3.4 ^b | Kelly et al. (1975) |
| S.Fork Rivanna, Virginia | - | - | 2.3 | 5.4 ^b | Kelly et al. (1975) |
| Rivanna Virginia | - | - | 2.0 | 5.3 ^b | Kelly et al. (1975) |
| South, iaginia | - | - | 1.3 | 2.6 ^b | Kelly et al. (1975) |
| Mechums, Virginia | - | - | 0.2-25.9 ^c | 4.8-22.9 ^b | Simonsen & Harremoes(1978) |
| Havelse, Denmark | 9-24 | 5-45 | 1.5-14.8 | 2.6-10.7 ^b | Gulliver et al |
| Experimental Channels | | | | | |

หมายเหตุ

^a Algal respiration only

^b Total community respiration

^c Measurements were made over the period of 1 year, and radiation varied by more than a factor of 10

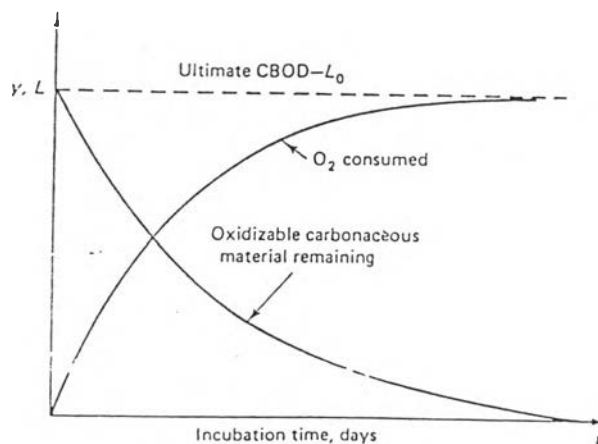
2.) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand ; BOD)

Tehobanoglous และ Schroeder (1987) กล่าวว่า สารอินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเมื่อมีการย่อยสลายอินทรีย์โดยสิ่งมีชีวิตจึงจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ดังกล่าว โดยปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ ค่าบีโอดี

ถ้าในน้ำมีสารอินทรีย์ในปริมาณน้อยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตจะสามารถทำให้สารอินทรีย์แตกตัวโดยไม่ทำให้สมดุลย์ของออกซิเจนในน้ำเสียไป เนื่องจากออกซิเจนที่แทนที่โดยธรรมชาติจะเกิดขึ้นเท่าเทียมกับผู้อย่อยสลายใช้ไป แต่ถ้ามีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไป ทำให้ประชากรของผู้อย่อยสลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก็จะเกิดปัญหาการขาดแคลนออกซิเจนในแหล่งน้ำเนื่องจากแบคทีเรียที่เป็นผู้อย่อยสลายนั้นใช้ออกซิเจนไปในกระบวนการย่อยสลายปริมาณมากเช่นเดียวกันและหลังจากนั้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำมีค่าเป็นศูนย์ก็จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นมา ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Andrews , Moore และ Leroy ,1972)

(1.) ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ

(1.1.) Carboneaceous Biochemical Oxygen Demand (CBOD) ซึ่งค่า CBOD นี้ถูกใช้โดยสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายอินทรีย์สารให้ได้เป็นพลังงานและคาร์บอน ซึ่งส่วนมากในแม่น้ำ ทะเลสาบ หรือในน้ำกร่อยก็จะมีสิ่งมีชีวิตพวกนี้อยู่เป็นจำนวนมาก ค่า CBOD ในตัวอย่างน้ำเสียหรือในตัวอย่างน้ำในแม่น้ำได้มาจากวิธีมาตรฐานของการใช้ออกซิเจนตลอดช่วงเวลาที่มีการบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะได้กราฟการใช้ออกซิเจนดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.9 แสดงอัตราการลดลงของออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์

Master (1991) กล่าวว่า การใช้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถประมาณโดยใช้ first - order differential equation โดยสมมติให้ อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เป็นสัดส่วนกับปริมาณของเสียที่มีทั้งหมด โดยสมการเป็นดังนี้

$$\frac{dL_t}{dt} = -kL_t \quad (2.54)$$

โดยที่ L_t = ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปหลังจากเวลาผ่านไป t (มิลลิกรัม/ลิตร)
 k = ค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์

หรือเขียนในรูปสมการอินทิเกรต ดังนี้

$$L_t = L_0 e^{-kt} \quad (2.55)$$

โดยที่ L_0 = ค่าเริ่มต้นของสารคาร์บอนที่มีอยู่ในขวดบีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)

ดังนั้น $L_0 = BOD_t + L_t \quad (2.56)$

เมื่อรวมสมการ 2.55 และ 2.56 จะได้

$$BOD_t = L_0(1 - e^{-kt}) \quad (2.57)$$

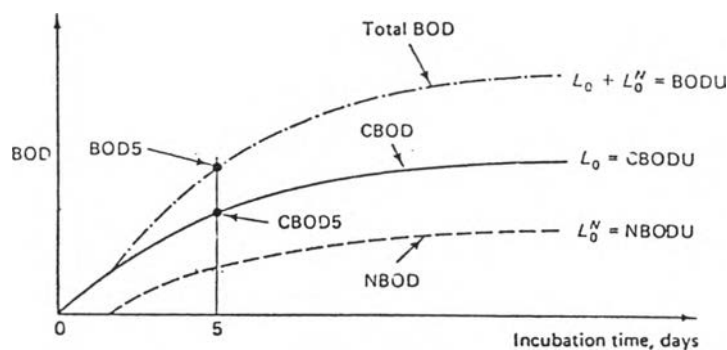
(1.2.) Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand หลังการย่อยสลายขั้นแรกของ CBOD ต่อมาเป็นการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน เช่น โปรตีน ยูเรีย แอมโมเนีย รวมถึงไนเตรต แอมโมเนียเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ดี นอกจากนั้นยังเป็นผลผลิตขั้นสุดท้ายของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ทำให้โปรตีนแตกตัว ดังนั้นแอมโมเนียในน้ำจึงมาจากน้ำทิ้งโดยตรงหรือมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในหลาย ๆ รูปแบบ และเมื่อแอมโมเนียถูกออกซิไดส์ภายใต้สภาพที่มีออกซิเจนจะได้ไนเตรต โดยแบคทีเรียกลุ่ม Nitrosomonas ดังสมการ



หลังจากนี้ไนเตรตจะถูกสร้างขึ้นโดยการออกซิไดส์ไนเตรต โดยแบคทีเรีย Nitrobacter ดังสมการ



ดังนั้นสรุปได้ว่า NBOD จะถูกสร้างขึ้นโดยการออกซิเดชันแอมโมเนียเป็นไนไตรท์และเปลี่ยนเป็นไนเตรต นั่นเอง (Thomann และ Mueller , 1987)



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CBOD , NBOD และ Total BOD

ตารางที่ 2.5 แสดงช่วงของค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ 20 องศาเซลเซียส

| Location | K_d (1/day@20 °C, base e) | Method of Determining Coefficient | Reference |
|-------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Potomac Estuary 1977 | 0.14 ± 0.023 | field study | US EPA (1979a) |
| Potomac Estuary 1978 | 0.16 ± 0.05 | | US EPA (1979b) |
| Willamette River, OR | 0.1-0.3 | | Baca et al.(1973) |
| Chattahoochee Rive, GA | 0.16 | | Bauer et al.(1979) |
| Yamuna River, India | 1.4 | | Bhargava (1983) |
| Merrimack R:ver, Mass | 0.01-0.1 | field study | Camp (1965) |
| Onondaga Lake, New York | 0.1 | model calibration | Freedman et al. (1980) |
| Yampa River, Colorado | 0.4 | model calibration | Grenney and Kraszewski (1981) |
| Skravad River, Colorado | 0.15 | field study | Hvitved-Jacobsen (1982) |

ตารางที่ 2.5 แสดงช่วงของค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ 20 องศาเซลเซียส (ต่อ)

| Location | K_d (1/day@20 °C, base e) | Method of Determining Coefficient | Reference |
|--------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Seneca Creek | 0.008 | | Metropolitan Washington Council of Governments(1982) |
| Kansas (6 rivers) | 0.02-0.06 | various methods | |
| Michigan (3 rivers) | 0.56-3.37 | | |
| Truckee River, Nevada | 0.36-0.96 | | |
| Virginia (3 rivers) | 0.30-1.25 | | |
| N. Branch, Potomac, WA | 0.4 | | |
| South Carolina (3 Rivers) | 0.3-0.35 | | |
| New York (2 rivers) | 0.125-0.4 | | |
| New Jersey (3 rivers) | 0.2-0.23 | | |
| Houston Ship Channel, TX | 0.25 | | |
| Cape Fear R. Estuary, NC | 0.23 | | |
| Holston River, Tenn | 0.4-1.5 | model calibration | Novotny and Krenkel (1975) |
| New York Bight | 0.05-0.25 | calibration | Report by Bansal (1975) |
| N. Fork Kings River, CA | 0.2 | lab and field | O'Connor et al. (1983) |
| Lake Washington | 0.2 | field study | Tetra Tech (1976) |
| Ouachita River, Arkansas | 0.15 | laboratory study | Chen and Orlob (1975) |
| San Francisco Bay Estuary | 0.2 | | Hydroscience (1979) |
| Boise river, ID | 0.75 | | Chen (1970) |
| W. Fork, Trinity River, TX | 0.06-0.3 | | Chen and Wells (1975) |
| Willamette River, OR | 0.07-0.14 | | Jennings et al.(1982) |
| Arkansas River, CO | 1.5 | | McCutcheon (1983) |
| Lower Sacramento River, CA | 0.41 | field study | Hydroscience (1972) |
| Deleware River Estuary | 0.31 | | |
| Wappinger Creek Estuary, NY | 0.31 | | |
| Potomac Estuary | 0.16-0.21 | | Thomann and Fitzpatrick (1982) |
| Speed River, Ontario | 1.0 | | Gowda (1983) |

ดังนั้น
 ดั่งนั้นสูตรที่ใช้คำนวณสมดุลย์ออกซิเจนในแบบจำลองคุณภาพน้ำ Orlob (1983) เสนอไว้

$$\frac{\partial (VO)}{\partial t} = - \text{Advection} + \text{Diffusion} + \text{Reaeration} - \text{BOD} - \text{Benthic demand} - \text{Ammonia}$$

$$\text{Oxidation} - \text{Nitrate oxidation} - \text{Detritus oxidation} - \text{Biotic respiration}$$

$$+ \text{Photosynthesis}$$

$$= -A + D + a_s K_2 (O^* - O) - K_1 L V - K_4 a_b (OS)^* - \beta_1 \alpha_1 (NH_3) V$$

$$- \beta_2 \alpha_2 (NH_3) V - \beta_3 \alpha_3 (DET) V - K_b (r_p P) V + K_b \gamma (\mu_p P) V \quad (2.58)$$

| | | | |
|--------|--|---|--|
| โดยที่ | O | = | ปริมาณออกซิเจนละลาย (ML ³) |
| | O [*] | = | ปริมาณออกซิเจนละลายที่จุดอิ่มตัว (ML ³) |
| | A | = | Advection rate (MT ⁻¹) |
| | D | = | Diffusion rate (MT ⁻¹) |
| | a _s | = | พื้นที่ผิวหน้าน้ำทั้งหมด (L ²) |
| | K ₂ | = | สัมประสิทธิ์การเติมอากาศ (LT ⁻¹) |
| | K ₁ | = | สัมประสิทธิ์การย่อยสลายสารอินทรีย์ |
| | L | = | ค่า CBOD (ML ³) |
| | K ₄ | = | ค่า Benthic Sediment Oxygen Demand (T ⁻¹) |
| | a _b | = | พื้นที่ผิวท้องน้ำ (L ²) |
| | (OS) [*] | = | การสะสมตะกอนสารอินทรีย์ต่อหน่วยพื้นที่ท้องน้ำ (ML ⁻²) |
| | NH ₃ | = | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (ML ⁻³) |
| | NO ₂ | = | ความเข้มข้นของไนไตรท์ (ML ⁻³) |
| | DET | = | Detritus concentration (ML ⁻³) |
| | α ₁ , α ₂ , α ₃ | = | สมดุลย์ของออกซิเจนสำหรับค่าแอมโมเนีย ไนไตรท์และ detritus |
| | β ₁ , β ₂ , β ₃ | = | สัมประสิทธิ์การย่อยสลายสำหรับแอมโมเนีย ไนไตรท์ และ detritus (T ⁻¹) |
| | P | = | ปริมาณของไฟโตแพลงตอน (ML ⁻³) |
| | r _p | = | อัตราการหายใจของไฟโตแพลงตอน (T ⁻¹) |

| | | |
|----------|---|--|
| μ_p | = | อัตราการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน (T^{-1}) |
| K_b | = | สัมประสิทธิ์ของกิจกรรมที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต |
| γ | = | Stoichiometric oxygenation factor for algal growth |

จากสมการดังกล่าวแล้วแสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนมีความสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นอย่างมากทั้งกิจกรรมในทางที่เพิ่มออกซิเจนจากกระบวนการแพร่กระจาย การเติมอากาศและการสังเคราะห์แสงหรือลดออกซิเจนในแหล่งน้ำจากกระบวนการเคลื่อนย้าย การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยสิ่งมีชีวิตรวมถึงการใช้ออกซิเจนในการหายใจ

ดังนั้น Dubbins (1964) ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณบีโอดีในแหล่งน้ำ ดังนี้

- 1.) การลดลงของบีโอดีโดยการตกตะกอนหรือการดูดซับ
- 2.) การเพิ่มของบีโอดีจากการสะสมตะกอนหรือจากการแพร่ของบีโอดีจากส่วนของผลผลิตในย่อยสลายอินทรีย์สารจากชั้น benthic zone ขึ้นสู่ชั้นบนของน้ำ
- 3.) การเพิ่มของปริมาณบีโอดีเนื่องจากการปล่อยน้ำเสียลงแม่น้ำ
- 4.) การเคลื่อนย้ายออกซิเจนจากน้ำไปสู่ benthic layer เพื่อให้สิ่งมีชีวิตที่ต้องการใช้ออกซิเจนซึ่งอาศัยในชั้นนี้
- 5.) การเคลื่อนย้ายของออกซิเจนจากน้ำไปทดแทนก๊าซที่เกิดขึ้นในชั้น benthic layer
- 6.) การเพิ่มของออกซิเจนโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงตอนและพืชน้ำ
- 7.) การนำออกซิเจนไปใช้โดยกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- 8.) การแพร่อย่างต่อเนื่องของทั้งบีโอดีและออกซิเจน โดยการแพร่กระจายตามความยาวของลำน้ำ

Frankel และ Henson (1968) เพิ่มเติมปัจจัยที่ควรพิจารณาร่วมด้วย ดังนี้

- 9.) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลำน้ำ ทำให้ลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลต่อการเติมออกซิเจนจากอากาศมาสู่ลำน้ำ
- 10.) ผลกระทบของสารแขวนลอยและสารละลายทำให้มีผลต่ออัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนจากอากาศสู่ลำน้ำ
- 11.) การผันแปรของปริมาณออกซิเจน บีโอดีและอุณหภูมิและปริมาณการไหลเข้ามาในลำน้ำ

3.) อุณหภูมิ (Temperature)

ตัวแปรที่สำคัญสำหรับคุณภาพน้ำในทุกแม่น้ำ คือ อุณหภูมิ เนื่องจากในหลาย ๆ กระบวนการของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำมักขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เช่น ปริมาณออกซิเจนละลายและมลสารตัวอื่น (Chow et al.,1979)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแหล่งน้ำเกิดจากการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ต่อมาเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อน อุณหภูมิมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำมาก เช่น เป็นตัวควบคุมการแพร่พันธุ์ การเจริญเติบโตของสัตว์และพืช ความร้อนยังมีอิทธิพลต่อการหมุนเวียนและการผสมกลมกลืนของน้ำในแหล่งน้ำ เป็นต้น (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2536)

Krenkel และ Parker (1969) ; Jobson และ Yotsukura (1972) ; Heiolt (1975) กล่าวว่า กระบวนการซึ่งมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1.) การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างน้ำกับอากาศ ตัวกลางที่นำความร้อนผ่านกระบวนการพาความร้อนและการผสมกันของการไหลแบบสับสน (turbulant flow) โดยการพาความร้อนในอากาศนั้น ส่วนมากจะเกิดจากลม ดังนั้น ความเร็วลมก็เป็นสิ่งสำคัญถ้าไม่มีลมพัด การไหลแบบสับสนก็จะเป็นกลไกหลักในการแพร่ของความร้อนในอากาศ

2.) การแลกเปลี่ยนพลังงานกับพื้นน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากการพาความร้อนของพื้นท้องน้ำเนื่องจากมีระดับอุณหภูมิต่างกันเล็กน้อยระหว่างน้ำกับพื้นท้องน้ำ

3.) การผลิตความร้อนภายในแม่น้ำ เกิดในแม่น้ำที่มีมลพิษมาก โดยเกิดจากกระบวนการทางเคมีและความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล

4.) การใช้พลังงานความร้อนที่มีสาเหตุมาจากมนุษย์ เช่น ความร้อนที่เกิดจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

นอกจากนี้ยังแบ่งการส่งพลังงานมายังผิวน้ำเป็น 3 องค์ประกอบ ดังนี้

1.) พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นสั้น ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นนี้จะไม่ดูดกลืนโดยบรรยากาศ เป็นช่วงแสงที่มองเห็น ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศและความสูงของภูเขาและส่วนหนึ่งของช่วงคลื่นที่มองเห็นจะถูกสะท้อนกลับและส่วนที่เหลือเป็นความร้อนในน้ำซึ่งสัดส่วนของการสะท้อนขึ้นอยู่กับมุมที่สะท้อน แต่ส่วนมากการสะท้อนกลับจะน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

2.) การแผ่รังสีของคลื่นยาวในบรรยากาศ จะแพร่ออกมาโดยบรรยากาศเหนือน้ำ ซึ่งความเข้มของคลื่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศและความชื้น พบว่า ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของการแผ่รังสีคลื่นยาวในบรรยากาศจะถูกสะท้อนกลับสู่บรรยากาศ

3.) การแผ่รังสีของคลื่นยาวในแม่น้ำ จะถูกปล่อยมาจากผิวน้ำที่บางมาก เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของน้ำสำหรับคลื่นความร้อนนี้สูง ดังนั้น อุณหภูมิผิวน้ำจะแปรผัน ซึ่งเป็นตัวตัดสินการสูญเสียพลังงานของแม่น้ำ

4.) ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียและแหล่งน้ำ

แบคทีเรียเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของแหล่งน้ำ โดยมีบทบาทต่อแหล่งน้ำในการใช้สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เพื่อสร้างพลังงานและเพื่อการดำรงชีวิตผลจากการย่อยสลายสารดังกล่าวจะได้สารอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ต่าง ๆ และอนินทรีย์สารด้วย (Vilee, 1972) ซึ่งพวกอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารที่มีโมเลกุลเล็กลงนี้พืชจะสามารถนำไปใช้เป็นอาหารหรือสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเสมือนตัวควบคุมธาตุอาหารต่าง ๆ ในน้ำให้มีการหมุนเวียนตลอดเวลา นอกจากนี้แบคทีเรียเองก็ยังถูกใช้เป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในน้ำได้อีกด้วย (Wood, 1967)

บทบาทที่สำคัญมากอีกประการหนึ่ง คือ แบคทีเรียจะมีส่วนทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงโดยแบคทีเรียบางพวกจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำในการย่อยสลายอินทรีย์สาร ซึ่งหากมีปริมาณอินทรีย์สารมาก ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำจะถูกใช้ไปมากหรือปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในน้ำมีระดับต่ำ ซึ่งปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำไม่ควรน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะถ้าปริมาณต่ำกว่านี้อาจมีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำได้ (อินทรา เผ่าจินดา, 2530 อ้างถึงใน กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2525)

(1.) สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ

สภาพแวดล้อมทางกายภาพและเคมีมีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำและจะแตกต่างกันไปตามแหล่งน้ำแต่ละชนิด ดังนี้

(1.1) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญและเพิ่มจำนวนและมีชีวิตอยู่ในสิ่งแวดล้อม ซึ่ง Stanier et al(1976) ได้แบ่งชนิดของแบคทีเรียตามความต้องการช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมได้ 3 ประเภท คือ

- Psychrophilic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญอยู่ได้ที่อุณหภูมิมระหว่าง 15 - 20 องศาเซลเซียส เช่น *Pseudomonas* เป็นต้น
- Mesophilic bacteria สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 24 - 40 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค เช่น *Salmonella* , *Escherichia coli* เป็นต้น
- Thermophilic bacteria เป็นแบคทีเรียที่เจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูงโดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45 - 85 องศาเซลเซียส เช่น *Thermotrix thiopara* , *Bacillus subtilis* , *Bacillus coagulans*

(1.2) ความกดดันของน้ำ (Hydrostatic pressure)

น้ำผิวดินและน้ำในมหาสมุทรลึก ๆ มีความกดดันต่างกัน ความกดดันของน้ำจะทำให้ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำทะเลลดลง ทำให้ความสามารถในการละลายสารอาหาร เช่น ไบคาร์บอเนตเปลี่ยนไป และทำให้จุดเดือดของน้ำสูงขึ้น ความกดดันของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความลึก คือ เพิ่มขึ้น 1 บรรยากาศทุก 10 เมตร ในมหาสมุทรลึกตั้งแต่ 1,000 เมตร จนถึง 10,000 เมตรก็ยังพบจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเป็นพวกชอบความกดดันของน้ำ (barophilic microorganisms)

(1.3) แสงสว่าง (Light)

สิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนใหญ่ต้องอาศัยสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์แสงได้ทั้งทางตรง และทางอ้อม ในแหล่งน้ำส่วนใหญ่ผู้ผลิตขั้นต้น คือ สาหร่าย ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะถูกจำกัดด้วยแสงที่ส่องลงมา ความลึกของน้ำที่แสงส่องลงมาถึงเรียกว่า โฟติคโซน (euphotic zone) จะแตกต่างกันไปตามฤดูกาล และขุ่นของน้ำ โดยทั่วไปการสังเคราะห์แสงเกิดที่น้ำระดับบน ๆ คือ 50 ถึง 125 เมตร นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังได้จากไบคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบ้างที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

(1.4) ความเค็ม (Salinity)

ในน้ำทะเลมีความเค็มสูงและมักคงที่ จุลินทรีย์ในทะเลส่วนใหญ่เป็นพวกชอบความเค็ม จะเจริญได้ดีที่ความเค็ม 2.5 - 4 เปอร์เซ็นต์ แต่จุลินทรีย์จากทะเลสาบและแม่น้ำจะไม่เจริญถ้ามีความเค็มมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

(1.5) ความขุ่น (Turbidity)

แหล่งน้ำมีความขุ่นไม่เท่ากัน ในบริเวณทะเลลึกจะใส บริเวณใกล้ฝั่งแม่น้ำจะมีความขุ่น สารแขวนลอยที่ทำให้น้ำมีความขุ่น ได้แก่ แร่ธาตุจากบนบก ซากสารอินทรีย์ จุลินทรีย์ที่แขวนลอย ความขุ่นของน้ำมีผลต่อการแพร่ผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์แสงด้วย สารที่เป็นอนุภาคจะเป็นชั้นสเตรตให้จุลินทรีย์มาเกาะ และเป็นชั้นสเตรตที่จะถูกเมแทบอลิซึมต่อไป แบคทีเรียในทะเลหลายชนิดเจริญได้เมื่อเกาะกับพื้นผิวที่แข็ง เราเรียกว่า เอพิแบคทีเรีย (Epibacteria) หรือเพอริไฟต์ (Periphytes)

(1.6) ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ค่า pH ของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ในธรรมชาติค่า pH อาจเปลี่ยนแปลงได้เสมอ เช่น เกิดการสลายตัวของอินทรีย์สารแล้วเกิดกรดอินทรีย์ หรือลำน้ำไหลผ่านการชะล้างแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น โดยปกติแบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญได้ดีเมื่อ pH ใกล้ความเป็นกลาง แต่จะมีช่วงปกติของการเจริญ คือ pH ตั้งแต่ 5.0 - 9.0 แต่อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียบางชนิดสามารถเจริญได้ในสภาพ pH ที่สูง เช่น เชื้อ *Vibrio cholerae* และ *Alcaligenes faecalis* และแบคทีเรียบางชนิดชอบ pH ต่ำเป็นแบคทีเรียทนกรด หรือ เรียกว่า acidophiles (สุราษฏร์ ภูอินทร์ และอมรา จันทรโอ, 2536)

(1.7) สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ (Inorganic and Organic constituents)

แบคทีเรียต้องการอาหารเพื่อการเจริญและได้พลังงาน นอกจากนี้ยังต้องการอาหารเสริมสร้าง ซึ่งได้แก่ สารประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ เนื่องจากแบคทีเรียมีพื้นฐานความต้องการอาหารต่างกัน จึงอาจนำความแตกต่างนี้มาจัดจำแนกแบคทีเรียออกได้เป็น 2 กลุ่ม (ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ และ วิวัฒน์ แดงสุภา, 2517) ดังนี้

- สารอินทรีย์ แบคทีเรียพวก heterotroph ใช้อินทรีย์สารเพื่อให้ได้พลังงาน และคาร์บอนเพื่อเป็นองค์ประกอบของเซลล์ หรือสร้างเซลล์ใหม่ หากในแหล่งน้ำมีสารอินทรีย์สารมากจะมีผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียประเภท heterotroph เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

- สารอนินทรีย์ แบคทีเรียพวก autotroph จะออกซิไดส์อนินทรีย์สาร เช่น กลีโอะแร่ต่าง ๆ เพื่อให้ได้พลังงาน แต่หากมีมากเกินไปอาจมีผลระงับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดได้

(1.8) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ นอกจากออกซิเจนจะเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างของแบคทีเรียแล้ว ออกซิเจนยังเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบผลิตพลังงาน หรือ aerobic respiration โดยออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนขั้นสุดท้ายที่จะเกิดเป็นน้ำแต่แบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งไม่ต้องการออกซิเจนในกระบวนการหายใจ โดยผลิตพลังงานจากระบบ fermentation ดังนั้นสามารถจำแนกแบคทีเรียตามความต้องการใช้ออกซิเจนเป็น 5 ประเภท (สุราษฎร์ ภูอินทร์ และอมรา จันทรโอ, 2536) ดังนี้

- Obligate aerobes เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต ไม่สามารถเจริญในสภาพที่ไร้ออกซิเจน

- Facultative anaerobes เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนที่สามารถเจริญต่อได้ในสภาพไร้ออกซิเจน โดยสามารถเปลี่ยนระบบหายใจเป็นระบบ Fermentation แต่จะได้รับพลังงานน้อยลง

- Obligate anaerobes เป็นพวกที่เจริญได้ในสภาพไร้ออกซิเจนเท่านั้น เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อเซลล์

- Aerotolerant anaerobes เป็นพวก anaerobes ที่สามารถทนอยู่ในสภาพที่มีออกซิเจน

- Microaerophilic bacteria เป็นพวก anaerobes แต่จะเจริญได้เฉพาะในสภาพที่มีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ปกติแหล่งน้ำจะมีค่าออกซิเจนละลายอยู่ประมาณ 6 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (สุรินทร์ มัจฉาชีพ และ สมสุข มัจฉาชีพ, 2524)

(1.9) การใช้ประโยชน์ที่ดิน การใช้ประโยชน์ที่ดินในด้านต่าง ๆ ย่อมมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำผิวดินโดยตรง Meiman และ Kurkle (1967) ได้เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินสองแบบ คือ พื้นที่ป่าธรรมชาติ และพื้นที่ที่ใช้เลี้ยงสัตว์ พบว่าการใช้พื้นที่ทำการเลี้ยงสัตว์มี

ผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียและฟีคัลสเตรปโตคอคโคแบคทีเรียในน้ำสูงขึ้น และ Weibel , Anderson และ Woodward, 1964) ศึกษาเปรียบเทียบน้ำที่ผ่านเมืองขนาดเล็กกับน้ำที่ไหลผ่านชนบท พบว่า น้ำที่ไหลผ่านเมืองขนาดเล็กจะมีโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียสูงกว่าน้ำที่ไหลผ่านชนบท

(2.) การตรวจหาปริมาณแบคทีเรียที่เป็นดัชนี

แหล่งน้ำต่าง ๆ รวมทั้งแหล่งน้ำใต้ดิน อาจได้รับการปนเปื้อนของเชื้อโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะเชื้อโรคทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งทำให้เกิดการระบาดของโรครุนแรงเป็นประจำ เช่น Salmonella , Shigella , Vibrio และอื่น ๆ (Keswick et al., 1982) ดังนั้นการตรวจคุณภาพน้ำเพื่อให้ทราบถึงการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ เหล่านี้ จึงเป็นสิ่งสำคัญแต่เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ตรวจพบยาก เนื่องจากมีอายุสั้น สามารถทนอยู่ในน้ำได้เพียงชั่วระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น (APHA ,1971) จึงนิยามหาแบคทีเรียที่สามารถใช้เป็นตัวชี้บ่งการปนเปื้อนได้ดีกว่า ซึ่งควรเป็นแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น สามารถตรวจพบได้ง่าย มีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เจริญได้รวดเร็วในอาหารเลี้ยงเชื้อธรรมดา ไม่ถูกยับยั้งด้วยแบคทีเรียชนิดอื่น และไม่ควรมีแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค (Hammer, 1975) ดังนั้นแบคทีเรียที่สามารถใช้เป็นตัวชี้ บ่งได้แก่ โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย โดย Bonde (1977) ได้เสนอคุณสมบัติที่สำคัญของแบคทีเรียที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพน้ำมี 8 ประการ ดังนี้

(2.1) สามารถตรวจวัดแบคทีเรียที่เป็นดัชนีได้ทุกครั้งที่ตรวจพบแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรค โดยเฉพาะโรคติดต่อในระบบทางเดินอาหาร

(2.2) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องตรวจพบว่ามีปริมาณมากกว่าแบคทีเรียที่เป็นเชื้อโรค

(2.3) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องมีความทนทานในสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่เป็นเชื้อโรค

(2.4) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีจะต้องขึ้นในอาหารที่เตรียมได้ง่าย

(2.5) แบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวชี้บ่งควรเจริญได้ดีโดยไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ

(2.6) แบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวชี้บ่งจะสามารถให้ผลการทดสอบที่ชัดเจนและตรวจสอบง่าย

(2.7) แบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวชี้บ่งควรกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

(2.8) แบคทีเรียที่เป็นดัชนีควรตรวจพบได้ก่อน ก่อนที่เชื้อจะก่อให้เกิดอันตราย

(3.) โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (total coliform and fecal coliform bacteria)

โคลิฟอร์มแบคทีเรียจัดอยู่ใน Family Enterobacteriaceae ซึ่งเป็นกลุ่มของพวก Aerobic และ Facultative Anaerobic เป็นแบคทีเรียรูปแท่ง แกรมลบ ไม่มีสปอร์ สามารถใช้น้ำตาลแลคโทสและให้ก๊าซภายในเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (APHA, 1971)

โกลมล คิวบวร ,เซาวยุทท พรพิมลเทพและสุวิทย์ ชุมนุมศิริวัฒน์ (2527) กล่าวถึง ข้อดีในการใช้โคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นดัชนี คือ สามารถตรวจหาได้ง่ายและสามารถตรวจพบได้แน่นอน ถ้ามีการปนเปื้อนของอุจจาระลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้โคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรครบบทางเดินอาหารอีกด้วย

เนื่องจากโคลิฟอร์มแบคทีเรียนี้มีกำเนิดมาจากหลายแหล่ง เช่น E. Coli ส่วนใหญ่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์มาจากสิ่งขับถ่ายของคนและสัตว์ Enterobacter aerogenes จะพบในสิ่งขับถ่ายของคน สัตว์และในดินด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ดัชนีที่จำแนกแหล่งที่มาของการปนเปื้อนนี้ด้วย (Harms et al., 1975)

แบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่ต่างกันตรงที่ฟีคัลโคลิฟอร์มสามารถใช้น้ำตาลแลคโทสและให้ก๊าซที่อุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส (Mitchell, 1972) ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิในการแบ่งแยกแหล่งที่มาได้ โดยถ้าต้องการหาโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด อาจใช้วิธี Multiple Tube Fermentation Technique หรือ Membrane Filter Technique บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ส่วนการตรวจหาฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียจะใช้วิธีเดียวกันแต่บ่มที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส (APHA, 1975)

(4.) การตรวจหาปริมาณฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ในการตรวจหาปริมาณฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย มีวิธีที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธี Gaudo และ Gauda (1981) ได้แก่

(4.1) Multiple Tube Method เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของน้ำ โดยผลของการวิเคราะห์จะออกมาเป็นค่า Most Probable Number (MPN) ของฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย/100 มิลลิลิตร การทดสอบด้วยวิธีนี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- การตรวจสอบขั้นแรก (Presumptive test) เป็นขั้นตอนแรกที่จะค้นหาแบคทีเรียที่สามารถหมักย่อยน้ำตาลแลคโทสที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 - 48 ชั่วโมงแล้วให้ผลผลิตเป็นกรดและก๊าซ โดยคาดว่าเป็นแบคทีเรียในกลุ่มของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ถ้าไม่มีการผลิตก๊าซแสดงว่า ไม่มีโคลิฟอร์มแบคทีเรีย โดยในการผลิตนี้โคลิฟอร์มแบคทีเรียจะผลิตกรดได้มากกว่าผลิตก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ผลิตออกมาจะเป็น hydrogen gas ซึ่งสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นสามารถเจริญในอาหารหรืออาจหมักแลคโทส แต่อาจผลิตได้เฉพาะกรดแต่ค่อนข้างน้อยที่จะสามารถผลิตได้ทั้งกรดและก๊าซ

- การตรวจสอบยืนยัน (Confirm test) เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผล โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเฉพาะสำหรับโคลิฟอร์มที่มาจากลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งเจาะจงกว่าใน Presumptive test โดยทำการถ่ายเชื้อจากหลอดที่ให้ผลบวกในหลอด Presumptive test มาใส่ใน EC medium แล้วนำไปเพาะเชื้อในตู้บเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 44.5 ± 0.02 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงเพื่อคัดแยกกลุ่มที่ให้ผลบวกปลอมหรือเพื่อยืนยันผลของขั้นตอนแรก

- การตรวจสอบขั้นสมบูรณ์ (Complete test) เป็นการทดสอบเพื่อคัดแยกโดยการตรวจลักษณะของแบคทีเรียที่ให้ผลในขั้นยืนยัน โดยสถาบันวิทยาจากปฏิกิริยาแบบแกรม

โดยทั่วไปการปฏิบัติงานด้านการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางแบคทีเรียที่อาศัยโคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นตัวบ่งชี้ มักนิยมปฏิบัติกันเฉพาะขั้นตอนแรก (Presumptive test) และขั้นตอนยืนยัน (Confirm test) เท่านั้น โดยนำผลที่อ่านได้จากขั้นตอนยืนยันมาอ่านค่า MPN index แล้วนำค่าของ MPN ที่อ่านได้มาคำนวณปริมาณของโคลิฟอร์มแบคทีเรียและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียโดยมีหน่วยเป็น MPN/100 ml (กรมอนามัย, 2538)

(4.2) Membrane Filter Method

เนื่องจาก MPN test มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ที่สูงและใช้เวลานานในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธี Membrane filter ขึ้น

โดยการตรวจสอบปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียและฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ อาศัยหลักการกรองด้วยเยื่อกรอง (Membrane filter) ซึ่งมีขนาดของรูกรอง 0.45 ไมครอน ซึ่งแบคทีเรียทั่วไปไม่สามารถซึมผ่านได้ จึงถูกดักอยู่บนผิวของเยื่อกรองและถูกเพาะเลี้ยงให้เจริญเติบโตเป็นโคโลนีอยู่บนแผ่นกรองด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ

M-FC Broth ซึ่งมี Lactose เป็นแหล่งพลังงานและมีเกลือโบล์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่ไม่ได้มาจากระบบทางเดินอาหารแล้วนำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 - 24 ชั่วโมงแล้วนับเฉพาะโคโลนีที่มีสีน้ำเงิน (typical colony)

การทดสอบเพื่อยืนยันว่าเป็นฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย สามารถกระทำโดยการตรวจสอบผลการผลิตก๊าซแมนนิทอล (Mannitol) ที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส

Collee, Duguid และ Marmion (1989) ได้ทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของ 2 วิธี คือ Membrane Filter Method มีข้อดีมากกว่า MPN Method คือ ต้องใช้แรงงาน วัสดุและอุปกรณ์ที่น้อยกว่า ในขณะที่ได้ผลการทดลองที่ง่ายกว่า MPN Method ส่วน MPN Method มีข้อดีตรงที่สามารถแสดงให้เห็นการเกิดก๊าซโดยแบคทีเรีย ซึ่งเหมาะกับการทดสอบในน้ำที่มีความขุ่นและมีสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กและแบคทีเรียที่เป็นตัวบ่งชี้เป็นจำนวนมากซึ่งมีผลในการระงับการเจริญเติบโตของโคลิฟอร์ม

(5.) แบบจำลองของพีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความปนเปื้อนจากของเสีย และยังเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในทางสาธารณสุข ในการศึกษาโดยแบบจำลองจะต้องคำนึงถึง อัตราการตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย Canale et al (1973) อธิบายอัตราการตายของโคลิฟอร์มในรูปสมการของสมการทรงมวล (mass balance equation) ดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = KC \quad (2.59)$$

เมื่อน้ำทิ้งถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำ โคลิฟอร์มแบคทีเรียจะกระจายเนื่องจากปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ และแพร่กระจายของของไหล (Waksman และ Hotchkiss ,1987)

(6.) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Callucci และ Pramer ,1959) ดังนี้

นี้

- (5.1) การดูดซับของแบคทีเรียของอนุภาคที่จะจมลง
- (5.2) แสงอาทิตย์
- (5.3) ขาดสารอาหาร
- (5.4) มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อการมีชีวิตของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
- (5.5) โรคของแบคทีเรีย
- (5.6) การล่าแบคทีเรียโดย Protozoa และ Zooplankton
- (5.7) การแข่งขันและการเป็นศัตรูกันสิ่งมีชีวิตอื่น

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายของโพลิฟอร์มเบคทีเรีย

| System | Temperature | k (1/hr) | Reference |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| Ohio River | Summer (20 °C) | 0.049 | Frost and Streeter (1924) |
| | Winter (5 °C) | 0.045 | |
| Upper Illinois River | June-September | 0.085 | Hoskins et al (1927) |
| | October and May | 0.105 | |
| | December-March | 0.024 | |
| | April and | 0.043 | |
| Lower Illinois River | November | 0.085 | Hoskins et al (1927) |
| | June-September | 0.037 | |
| | October and May | 0.026 | |
| | December-March | 0.029 | |
| "Shallow Turbulant Stream" | April and | 0.63 | Kittrell and Kochitzky (1947) |
| Missouri River | November | 0.02 | Kittrell and Furfari (1963) |
| Tennessee River (knoxville) | | 0.043 | Kittrell and Furfari (1963) |
| Tennessee River | Winter | 0.005 | Kittrell and Furfari (1963) |
| (Chattanooga) | Summer | 0.072 | Kittrell and Furfari (1963) |
| Sacramento River | Summer | 0.23 | Kittrell and Furfari (1963) |
| Cumberland River | Summer | 1.1 | Wasser et al (1934) |
| Glatt River | Summer | 0.021 | Wuhrmann (1972) |
| Groundwater Stream | | 0.017 | Mahloch (1974) |
| Leaf River (Mississippi) | 10 °C | 0.36 | Zanoni et al (1978) |
| Lake Michigan | | 0.4 | Gannon et al (1983) |
| FordLake (Ypsilanti, | 10-17 °C | 0.052 | Thornton et al (1980) |
| Michigan) | August | 0.109 and 0.016 | |

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยในการนำเอาสมการมาใช้จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของสูตรต่าง ๆ ในการคำนวณเป็นอันดับแรกและต้องมีความเชื่อถือในกฎต่างๆ ทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะต้องเชื่อถือได้ (Andrew และ Melone ,1976) แบบจำลองที่ดีนั้นสามารถใช้คาดการณ์ถึงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบย่อยในขณะเดียวกันก็ช่วยคาดการณ์ว่าจะอะไรจะเกิดขึ้นเมื่อภาวะการณ์ภายนอกระบบผันแปรไปจากเดิมหรือช่วยให้ทราบว่าอะไรบ้างเป็นปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดกระบวนการหรือพฤติกรรมต่าง ๆ โดยสรุปแล้ววัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองมี 5 ประการ (อิศรา พิริยะพิเศษพงษ์, 2540 อ้างถึงใน นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2537) คือ

1. เพื่อบอกถึงข้อเท็จจริงเกี่ยวกับระบบ
2. เพื่อบอกถึงแนวความคิดของผู้สร้างแบบจำลองที่มีต่อระบบและการจัดการระบบ
3. เพื่อทำให้ผู้สร้างและผู้อื่นในวงการวิเคราะห์ระบบ เกิดแนวความคิดใหม่ ๆ ในการสร้างและใช้แบบจำลองอย่างละเอียดถี่ถ้วนมากขึ้น
4. เพื่อใช้แบบจำลองคาดการณ์หรือพยากรณ์ว่าระบบจะแสดงพฤติกรรมอย่างไร ถ้าสิ่งหนึ่งสิ่งใดหรือหลายสิ่งในระบบผันแปรไป
5. เพื่อเป็นเครื่องมือชี้ให้เห็นว่า อะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่าง ๆ ที่บ่งบอกได้ถึงแนวทางในการจัดการ

2.4.1. ความเป็นมาของการใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ระบบ

ในอดีต วิธีทดสอบที่ดีที่สุดว่าการพัฒนาใด ๆ ที่กำหนดขึ้นจะประสบความสำเร็จหรือล้มเหลว นั่นก็คือ ปล่อยให้การพัฒนาที่ดำเนินไปตามความเป็นจริงของสถานการณ์ ซึ่งถ้าการพัฒนาที่ดำเนินไปด้วยดี ก็นับว่าประสบความสำเร็จโดยไม่ต้องมีการปรับปรุงแผนพัฒนา แต่ถ้าผลเกิดขึ้นในทางตรงกันข้ามอย่างน้อยสาเหตุของความล้มเหลวก็จะสอนให้นักพัฒนา รู้แนวทางว่าควรจะต้องดัดแปลงแก้ไขแผนการดำเนินงานไปในทิศทางใด วิธีการเช่นนี้จะใช้กันเสมอในการพัฒนาทรัพยากรในอดีตและได้ผลดีพอสมควร ในสภาวะการณ์ของโลกในขณะนั้น ปัจจุบันการพัฒนาใด ๆ มักจะต้องใช้การลงทุนสูงและมักจะเป็นการพัฒนาเพื่อกลุ่มชนขนาดใหญ่ ซึ่งถ้าจะเสี่ยงปล่อยให้การพัฒนาเป็นไปตามสถานการณ์ดังเช่นในอดีต ถ้าเกิดผิดพลาด ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้น มิใช่เพียงแต่การได้รับบทเรียนเท่านั้น แต่มีโอกาสทำให้ประเทศชาติหรือการพัฒนาที่เสียหายได้ ดังนั้นการประเมินผลที่อาจเกิดขึ้นล่วงหน้าโดยวิธีการต่าง ๆ ที่เป็นระบบ จึงเป็นสิ่งจำเป็นมากขึ้น

การใช้แบบจำลองในการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เป็นกรรมวิธีหนึ่ง โดยการตรวจสอบข้อสมมติฐานต่าง ๆ ก่อนในห้องปฏิบัติการ หรือใช้ทดลองกับบางพื้นที่จริง ในพื้นที่

เล็ก ๆ โดยแบบจำลองมักจะประกอบด้วยสมการคณิตศาสตร์หลายสมการประกอบกัน แสดงถึงกฎเกณฑ์หรือความสัมพันธ์ของสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในชีวิตประจำวันเกี่ยวกับความผันผวนและการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรที่ผู้ทำแบบจำลองให้ความสำคัญ

อย่างไรก็ตามแบบจำลองอาจเป็นเพียงตัวแทนของสถานการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วในอดีตถึงปัจจุบันเพื่อคาดการณ์ความเป็นไปในอนาคตได้ระดับหนึ่ง ซึ่งในทางวิทยาศาสตร์นั้น แบบจำลองคือ ตัวแทนของสรรพสิ่งอันใดอันหนึ่งและมักจะถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการคาดการณ์และควบคุมสรรพสิ่งนั้น ๆ แบบจำลองทำหน้าที่อธิบายถึงลักษณะ เหตุการณ์ กระบวนการหรือระบบมากกว่าที่จำใช้บรรยายว่าสิ่งเหล่านั้นเป็นอย่างไรหรือเกิดขึ้นอย่างไรได้ แบบจำลองมักจะถูกสร้างขึ้นมา เพื่อใช้หรือทำให้เข้าใจว่าถ้าหากสิ่งนั้นหรือระบบถูกเปลี่ยนแปลงไปทางใดทางหนึ่งหรือหลายทาง จะมีผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ของสิ่งนั้นหรือระบบนั้น ๆ อย่างไรบ้าง

แบบจำลองที่มีประโยชน์นั้นจะต้องสามารถใช้คาดการณ์ผลกระทบต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นจากการกำหนดนโยบายในการจัดการแบบต่าง ๆ ได้ โดยมีการเสี่ยงต่อความผิดพลาดน้อยที่สุดและไม่จำเป็นต้องประกอบด้วยสมการคณิตศาสตร์หรือกระบวนการเชื่อมโยงสมการที่สลับซับซ้อนจนเกินไป แต่ครอบคลุมการคาดหมายสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการรู้ได้กว้างขวาง แบบจำลองที่จัดว่าดีนั้น ควรจะต้องประหยัดทั้งเวลาในการทำงาน โดยสามารถรับข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นได้มากพอสมควร

แบบจำลองที่ดีจะต้องเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการเข้าใจของผู้ที่อยู่ในวงการโดยทั่วไปและชี้ให้เห็นข้อเท็จจริงของพฤติกรรมที่ใช้แบบจำลองแทนได้อย่างเด่นชัด ทำให้ผู้ใช้เข้าใจแบบจำลองง่ายและใช้ได้อย่างสะดวกทั้งโดยตรงและในกรณีที่จะต้องมีการดัดแปลงแก้ไข ทั้งนี้เพราะถ้าหากแบบจำลองนั้นง่ายต่อการเข้าใจ ก็จะสามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลที่คาดคะเนออกมาได้หรือสามารถหาข้อผิดพลาดจากการใช้ข้อมูลได้อย่างคล่องตัว นอกจากนี้แล้ว แบบจำลองที่ดีจะต้องสมเหตุสมผล เช่น แบบจำลองทางวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อมนั้น ถือว่าความแน่นอนของความสมจริงและความกระฉับกระชวยของการอธิบายพฤติกรรมของระบบเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเท่าเทียมกับการที่จะคาดการณ์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ภายได้ข้อจำกัดหลายประการดังกล่าว แบบจำลองที่ดี จึงควรเป็นแบบจำลองที่แทนโครงสร้างและการทำงานของระบบได้อย่างสมจริงสมจังที่สุด

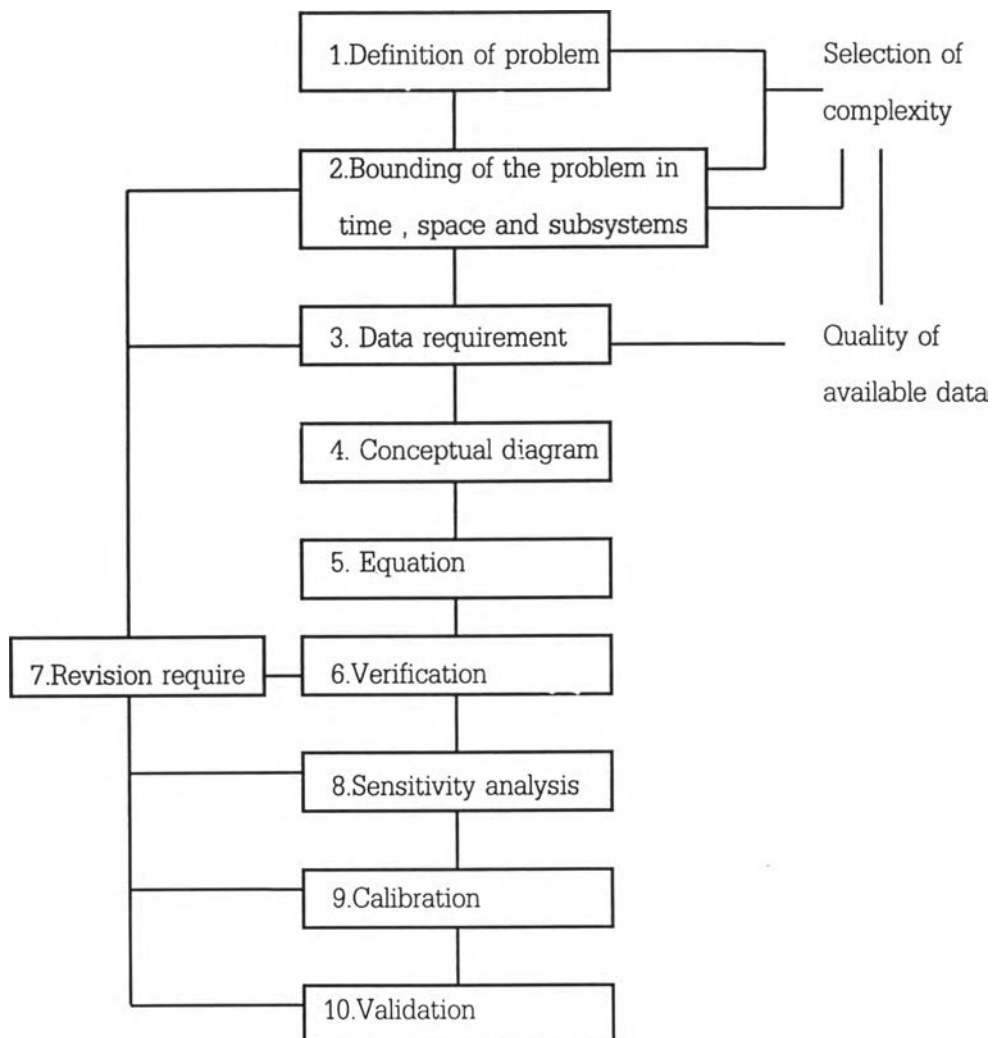
แบบจำลองที่สลับซับซ้อนนั้น ไม่ได้หมายความว่าจะใช้คาดการณ์ออกมาได้ดีกว่าแบบจำลองในรูปแบบง่าย ๆ เสมอไป ทั้งนี้เพราะเมื่อผันตัวแปรเพิ่มมากขึ้น แบบจำลองก็ต้องมีเงื่อนไขกำกับเพิ่มมากขึ้นไปด้วย โดยมีขั้นตอนที่กำหนดให้ผู้สร้างแบบจำลองดำเนินการได้ดังรูป 2.11 ซึ่งอธิบายได้โดยย่อ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ เพื่อใช้กำหนดรูปแบบและทิศทางของแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดกรอบของปัญหาให้อยู่ในรูปของเวลาและพื้นที่และระบบย่อยของระบบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3 ความต้องการในข้อมูล ซึ่งจะมีปริมาณและคุณภาพมากน้อยเพียงไร ขึ้นอยู่กับความ สลับซับซ้อนของแบบจำลองที่จะสร้างข้อมูลที่มีอยู่แล้ว ในกรณีนี้ที่ข้อมูลมีข้อจำกัดก็ อาจจำเป็นต้องลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงหรือกำหนดของปัญหาให้เล็กลงไป

ในขั้นตอนที่ 1 - 3 มักจะถูกจำกัดด้วยงบประมาณ เวลาและข้อมูลที่มีอยู่ ผู้สร้างแบบจำลองที่เริ่ม ต้นใหม่ ๆ และมีความเข้าใจในโครงสร้างและการทำงานของระบบอย่างดี มักจะออกแบบโครงสร้างของแบบ จำลองที่เกินขีดจำกัดของงบประมาณ เวลา และข้อมูลที่มีอยู่เสมอ



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2537)

- ขั้นตอนที่ 4** เขียนโครงสร้างของแบบจำลองจากแนวคิดที่ผู้สร้างมีอยู่ หรือจากกลุ่มผู้สร้างขั้นตอนนี้อาจทำก่อนขั้นตอนรวบรวมข้อมูล แต่มักจะถูกจำกัดด้วยข้อมูลที่มีอยู่การเขียนโครงข่ายของแบบจำลอง จึงมักทำภายหลังจากที่ทราบปริมาณและคุณภาพของข้อมูลแล้ว
- ขั้นตอนที่ 5** สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์และความสัมพันธ์ของระบบที่เชื่อมโยงกับการให้คำตอบของปัญหาที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ในขั้นตอนนี้จะคำนึงถึง
- 1.) จะให้แบบจำลองช่วยตัดสินใจแก้ปัญหา ให้คำตอบเรื่องอะไร ในระดับใด
 - 2.) จำแนกองค์ประกอบ (ตัวแปร) ของแบบจำลองที่จะเป็นตัวกำหนด (regulate) และตัวให้ผลลัพธ์ให้ครบถ้วน
 - 3.) สร้างความสัมพันธ์เชื่อมโยงตัวแปรต่าง ๆ โดยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยผลงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นหลักหรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ
 - 4.) กำหนดพารามิเตอร์ที่จะเป็นข้อมูลออก อินดิเคเตอร์ กำหนดช่วงเวลา (time interval) และระยะเวลา (time span) ที่จะให้แบบจำลองหาคำตอบให้
 - 5.) ผนวกแบบจำลองย่อยต่าง ๆ เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบและมีระเบียบสอดคล้องกับพฤติกรรมธรรมชาติ
- ขั้นตอนที่ 6** ทดลองการทำงานของแบบจำลองและความถูกต้องของผลลัพธ์ เมื่อเชื่อมโยงสมการหรือแบบจำลองย่อยต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้ว ถ้าเป็นขั้นการทดสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถทำงานหรือคำนวณได้ตามที่ต้องการหรือไม่มีความถูกต้องตามหลักตรรกะและอธิบายความเป็นไปของกระบวนการต่าง ๆ ได้ตามที่คิดไว้หรือไม่ ขั้นตอนนี้ส่วนมากจะใช้ข้อมูลที่มีอยู่แล้วในอดีต เป็นตัวทดสอบ
- ขั้นตอนที่ 7** การแก้ไขปรับปรุงแบบจำลอง กรณีที่การทำงานยังไม่ดีพอ ซึ่งอาจเกิดจากแบบจำลองยังไม่สมบูรณ์ หรือการเชื่อมต่อกันไม่เป็นไปตามตรรกะ หรือรายละเอียดในแบบจำลองย่อย ยังไม่เพียงพอ หรือตั้งวัตถุประสงค์ไว้มากเกินกว่าข้อมูลที่มีอยู่จะหาคำตอบให้ได้ ก็จะต้องมีการทบทวนกันใหม่ โดยกลับไปเริ่มที่ขั้นตอนที่ 2 ใหม่ก็จะทำให้ได้แบบจำลองที่ให้ความพอใจได้
- ขั้นตอนที่ 8** ในกรณีที่แบบจำลองทำงานได้ดีแล้ว มีความถูกต้องแม่นยำ ตามที่ตั้งเกณฑ์ไว้แล้ว ก็คงจะต้องมีการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในแบบ

จำลอง (sensitivity analysis) ว่า เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ คงที่แล้ว การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ตัวหนึ่งไปในระดับต่าง ๆ จะทำให้มีผลลัพธ์ออกมาแตกต่างกันไปจากเดิมอย่างมีตรรกะและระดับการเปลี่ยนแปลงยอมรับได้หรือไม่ ถ้ายังไม่ตอบสนองในระดับที่ดีพอก็ต้องกลับไปเริ่มขั้นตอนที่ 7 คือทบทวนแบบจำลองกันใหม่อีกจนพอใจ

ขั้นตอนที่ 9 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ในแบบจำลอง ขั้นตอนนี้มักจะทำกันเสมอในเกือบทุกแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าตรงหรือใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงหรือที่ควรจะเป็น ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองนั้นมีโอกาสเลียนแบบของจริงได้ 100% ค่าที่ได้จึงมักคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง จึงต้องมีการเปรียบเทียบเพื่อพยายามหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองและค่าที่ได้จากการสำรวจของแต่ละพารามิเตอร์โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวที่เกี่ยวข้อง โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) หรือใช้การพัฒนาโปรแกรมเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่จะให้ค่าที่แตกต่างกันให้น้อยที่สุดระหว่างค่าสำรวจและค่าที่ได้จากการคำนวณ (Jorgensen, 1991)

ขั้นตอนที่ 10 การพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) เป็นการทดสอบว่าแบบจำลองทำงานได้ดีและถูกต้องเพียงใด เมื่อกำหนดสภาวะต่าง ๆ ในการจัดการระบบเปลี่ยนแปลงไป ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนการตรวจประสิทธิภาพและประสิทธิผลของแบบจำลองว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภายนอก ที่เป็นข้อมูลเข้า (input data) แล้วแบบจำลองจะทำงานได้ถูกต้องสมเหตุสมผลหรือไม่ ซึ่งถ้ามาถึงขั้นตอนนี้แล้ว แบบจำลองให้ผลถูกต้องแน่นอนและมีตรรกะในทุกกรณีแล้วก็จะสามารถนำไปประยุกต์ในพื้นที่อื่นๆ เพื่อหาคำตอบมาช่วยในการกำหนดนโยบายการจัดการได้เป็นอย่างดี

วิธีการจำลองสภาพโดยใช้แบบจำลองนี้ ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential) การแก้สมการเหล่านี้ไม่สามารถคำนวณคำตอบได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้สมมติฐานบางประการและเทคนิคการคำนวณคำตอบ ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แทนโครงสร้างและกระบวนการที่สลับซับซ้อนของระบบใด ๆ แล้วจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ โดยจะต้องเขียนโปรแกรมเข้าสู่คอมพิวเตอร์ แล้วจะได้ข้อมูลออกตามที่ต้องการ ความยากง่ายของแบบจำลองอยู่ที่ตัวแปรที่เป็นข้อมูลเข้าและข้อมูลออกที่มีหลายตัว

แปรและมีความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสลับซับซ้อน ชนิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และปรากฏการณ์ที่เราจะศึกษา

สงวน ปัทมธรรมกุล (2529) กล่าวถึง ข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองไว้ ดังนี้

ข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- 1) สามารถได้แบบจำลองที่เป็นจริงและแม่นยำเท่าที่ข้อมูลจะให้ได้ รวมทั้งงบประมาณ เครื่องอำนวยความสะดวก กำลังคนที่มีพอในการเก็บข้อมูลซึ่งการในส่วนนี้จะป็นงานที่สิ้นเปลืองเวลาและเงินมากที่สุด
- 2) ข้อมูลจำนวนมากทั้งจริงและสังเคราะห์ สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์โดยแบบจำลองได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อหานโยบายในการใช้งาน
- 3) แบบจำลองที่ผ่านการปรับเทียบแล้วสามารถนำมาทำนายประสิทธิภาพการให้งานของนโยบายการใช้งานต่าง ๆ ได้

ข้อบกพร่องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- 1) นโยบายที่ดีที่สุดไม่ได้โดยตรง ต้องผ่านการทดลองเปลี่ยนค่ามากครั้งจึงได้คำตอบ ซึ่งอาจเปลืองเวลามาก
- 2) นโยบายที่ดีที่สุดที่ทำได้อาจจะยังไม่ใช่ว่าดีที่สุดจริง ๆ

2.4 การจัดการคุณภาพน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พรยศ เทียนทอง (2538) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรมสำเร็จรูป Lotus 1-2-3 รีลีส 2.01 ศึกษาคุณภาพน้ำในแม่น้ำป่าสักตอนล่างบริเวณจังหวัดสระบุรี โดยต้องมีข้อมูลหน้าตัดลำน้ำ อัตราการไหล ระดับน้ำและข้อมูลคุณภาพน้ำ (บีโอดี ออกซิเจนละลายและอุณหภูมิของน้ำ) ผลการวิจัยพบว่าในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำการพยากรณ์คุณภาพน้ำของแม่น้ำป่าสักทุก ๆ 5 ปี โดยใช้ข้อมูลเริ่มต้นในปี พ.ศ.2536 เมื่อกรณีไม่มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำบริเวณท้ายน้ำจะมีค่าบีโอดี เท่ากับ 1.93 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าออกซิเจนละลาย เท่ากับ 5.04 มิลลิกรัมต่อลิตร กรณีที่มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะมีค่าบีโอดี เท่ากับ 1.89 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าออกซิเจนละลาย เท่ากับ 5.05 มิลลิกรัมต่อลิตร กรณีที่มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งจากชุมชนเมืองสระบุรีแห่งเดียว จะมีค่าบีโอดี เท่ากับ 1.91 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าออกซิเจนละลาย เท่ากับ 5.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

กฤษฎา มหาสันตะ (2539) นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 มาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง (อำเภอบางไทร จังหวัดอยุธยา จนถึงปากแม่น้ำที่จังหวัดสมุทรปราการ) โดยทำการวิจัยในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งเป็นช่วงที่คุณภาพน้ำวิกฤตที่สุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาในอนาคต ในกรณีที่มีโครงการบำบัดน้ำเสียชุมชนของกรุงเทพมหานครและกรณีไม่มีโครงการบำบัดน้ำเสีย ผลการคำนวณ พบว่า แม่น้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ.2537 มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานแหล่งน้ำประเภทที่ 4 โดยมีค่าบีโอดีสูงสุด เท่ากับ 6.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลจากการมีโครงการบำบัดน้ำเสียกรุงเทพมหานครระยะที่ 1 คือ แม่น้ำเจ้าพระยาจะมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำประเภทที่ 4 จนถึงปี พ.ศ.2540 เท่านั้น คือมีค่าบีโอดีสูงขึ้นอีกวันแต่จะมีการใช้มาตรการที่มีประสิทธิภาพเพื่อแก้ไขต่อไป

อิศรา พิริยะพิเศษพงษ์ (2540) ทำการปรับเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 เพื่อจัดการคุณภาพน้ำผิวดิน บริเวณโรงไฟฟ้าและเหมืองแม่เมาะ ซึ่งพารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่ศึกษา คือ ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด (TDS) และซัลเฟต (Sulfate) โดยผลการปรับเทียบแบบจำลองทางชลศาสตร์ (HD Model) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่ง (Manning'n) ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.033 - 0.050 ส่วนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Dispersion coefficient) มีค่าระหว่าง 700 - 900 เมตร²/วินาที ส่วนผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งสอง พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการสำรวจไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Liengcharernsit. (1979) ทำการเปรียบเทียบอัตราการตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำกลั่น น้ำทะเลตามธรรมชาติและน้ำทะเลต้ม โดยผลการทดลองพบว่า อัตราการตายของโคลิฟอร์มในน้ำกลั่นและน้ำทะเลตามธรรมชาติจะเป็นไปตาม first-order decay ระหว่าง 24 ชั่วโมง ขณะที่อัตราการตายของโคลิฟอร์มในน้ำทะเลต้ม จะตายหลังจาก 24 ชั่วโมง หลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไป อัตราการตายในน้ำกลั่นและน้ำทะเลจะมีอัตราการตายลดลง ขณะที่โคลิฟอร์มในน้ำทะเลต้มเริ่มที่จะย่อยสลายตาม first order decay ดังนั้นพบว่า ในน้ำทะเลตามธรรมชาติและน้ำกลั่นจะมีโคลิฟอร์มแบคทีเรียตายภายใน 24 ชั่วโมงอยู่ 90-95% ขณะที่ 90% ของโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำทะเลต้มจะตายภายใน 48 ชั่วโมง ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าความเค็ม (Salinity) ของน้ำไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญของอัตราการตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรียเนื่องจากผลของทั้งน้ำกลั่นและน้ำทะเลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Ted M Spar (1979) ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Dispersion coefficient) ที่เหมาะสมในการจำลองคุณภาพน้ำ โดยแบบจำลองที่ใช้ คือ QUAL 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองทิศทางเดียว (one - dimention) สำหรับการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายของมลสารในน้ำจืด มีสมมติฐานของแบบจำลองคือ แม่น้ำต้องมีอัตราการไหลคงที่ มีการผสมกันของมลสารอย่างสมบูรณ์ตามแนวขวางของลำน้ำ มีแหล่งปล่อยมลพิษที่คงที่และมีปริมาณน้ำเข้าและออกคงที่ โดยในการศึกษามีแหล่งมลพิษหลัก 2 โรงงาน เป็นโรงงานสีย้อมผ้าซึ่งมีปริมาณน้ำเสีย 240,000 cfs และ 800,000 cfs ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถคำนวณพารามิเตอร์ ดังนี้ อุณหภูมิ บีโอดี ออกซิเจนละลาย โคลิฟอร์มแบคทีเรียและสารที่ไม่ย่อยสลาย ในกรณีนี้หมายถึง สีย้อมผ้า ซึ่งมี 2 ชนิด คือ Rhodamine B dye และ Rhodamine WT dye ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Dispersion coefficient) ที่เหมาะสมสำหรับแม่น้ำนี้มีค่าเท่ากับ 300 ตารางฟุตต่อวินาที

Holmes (1982) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Bedford Ouse Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่คำนวณในสภาวะ steady state โดยนำมาใช้ศึกษาแม่น้ำ Aire ซึ่งเริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลรายวันของการปล่อยน้ำทิ้ง การดึงน้ำไปใช้ การไหลของน้ำในคลองหรือแม่น้ำ การไหลของน้ำในอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลคุณภาพน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและข้อมูลจากการตรวจวัดคุณภาพน้ำตามจุดเก็บ โดยผลการประเมินอัตราการไหลในทุก ๆ จุดของแม่น้ำโดยใช้สถิติ Regression เป็นตัวทดสอบพบว่า ค่าที่ได้จากการวัดอัตราการไหลกับค่าที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลองไม่แตกต่างกัน รวมทั้งการนำสถิติสหสัมพันธ์มาทดสอบ (Correlation coefficient) จนได้ค่า Correlation coefficient จนได้ค่า coefficient 2 ค่า ดังนี้ ตอนบนของลำน้ำมีค่า เท่ากับ 0.88 และตอนล่างของลำน้ำมีค่า เท่ากับ 0.9 ส่วนผลการเปรียบเทียบในส่วนของคุณภาพน้ำ พบว่าการเปรียบเทียบเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากการคำนวณ

ปริมาณน้ำเสียที่คลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนของการเก็บตัวอย่างน้ำมาทดสอบ รวมถึงช่วงเวลาเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละจุดเก็บต่างกันทำให้เกิดความผิดพลาดได้

Tischer and Bradley (1986) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดการคุณภาพน้ำในแม่น้ำฮานด์ตอนล่างของประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งการไหลของแม่น้ำถูกควบคุมโดย เขื่อน Paldang และตอนล่างมีอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง โดยในการศึกษานี้ต้องการข้อมูลทางอุทกวิทยาและข้อมูลทางกายภาพของลำน้ำ และมีการคำนวณความเร็วในการไหลโดยใช้แบบจำลอง HEC-II ส่วนการจัดการคุณภาพน้ำนั้นแบบจำลองที่ใช้ คือ แบบจำลอง QUAL-II ซึ่งก่อนจะนำแบบจำลองมาใช้จะต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) แบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลปริมาณการปล่อยน้ำเสีย การไหลของแม่น้ำและข้อมูลคุณภาพน้ำในการปรับเทียบจะเลือกพารามิเตอร์ ดังนี้ บีโอดี ออกซิเจนละลาย อุณหภูมิ แอมโมเนีย ไนเตรต ฟิคัลโคลิฟอร์มและคลอไรด์ โดยสัมประสิทธิ์ที่ใช้ปรับเทียบได้แก่ BOD removal coefficient , Rearation coefficient , Ammonia removal coefficient อัตราการไหลของน้ำจากอ่างเก็บน้ำ Paldang โดยเมื่อปรับเทียบจนได้สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมแล้ว พบว่าการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองสำหรับค่าออกซิเจนละลาย สามารถยอมรับได้ด้วยความเชื่อมั่น 95% โดยแบ่งเป็นค่าที่ออกนอกช่วงความเชื่อมั่นอยู่ 47 ค่า ซึ่ง 57% เป็นการคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ± 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 98% ที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่า ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนข้อมูลบีโอดี การตรวจสอบพบว่า มีค่าออกนอกช่วงที่ยอมรับได้อยู่ 32 ค่า โดย 63% มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ± 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงถึงว่าระดับการปรับเทียบอยู่ในระดับดี โดยพารามิเตอร์ข้างต้น ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ Sensitivity analysis พบว่า ทุกพารามิเตอร์แปรผันอยู่ในช่วง 50% ยกเว้นการไหลของเขื่อน Paldang ซึ่งแปรผันอยู่ในช่วง $\pm 20\%$

AL-Layla and AL-Rizzo (1989) ศึกษาแม่น้ำ Tigris ซึ่งตั้งอยู่ที่ชายเขื่อน Saddam ในประเทศอิรัก มีความยาวประมาณ 75 กิโลเมตร ซึ่งได้รับการระบายน้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม รวมถึงการชะล้างของน้ำฝนและแหล่งอื่น ๆ ซึ่งล้วนแต่ไม่มีระบบบำบัดทั้งสิ้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้ เพื่อจะคาดการณ์ผลกระทบในอนาคตของแม่น้ำที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงและหามาตรการในการจัดการแหล่งน้ำเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำตามที่ต้องการ โดยใช้แบบจำลอง QUAL II ซึ่งใช้สมการ fully implicit finite difference procedure และจะแบ่งแม่น้ำเป็นช่วง ๆ (Reach) ซึ่งแต่ละช่วงจะมีลักษณะทางธรณีวิทยา อุทกวิทยา เคมีและชีววิทยา คล้าย ๆ กัน และในแต่ละช่วงยังสามารถแบ่งย่อยเป็น computational element ซึ่งจะมีปริมาตรคงที่ มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ในแต่ละ computational element โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ บีโอดี ออกซิเจนละลาย แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรท์ ฟอสเฟต คลอไรด์ ซัลเฟต ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดและโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ปรากฏว่าแบบจำลองมีผลการปรับเทียบที่แตกต่างกันไม่มากระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดจริง แต่พารามิเตอร์บางตัว

คือ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย เนื่องจากขาดข้อมูลที่จะนำมาคำนวณรวมถึงความซับซ้อนของสูตรในแบบจำลอง เช่นการที่มีการบำบัดตัวเองของแบคทีเรียทำให้โคลิฟอร์มมีความเข้มข้นลดลงที่ท้ายน้ำ การไม่เพียงพอในการคำนวณภาระโคลิฟอร์มที่ลงมาในแม่น้ำ ซึ่งควรมีการคำนวณเพิ่มเนื่องจากการทำฟาร์มปศุสัตว์และช่วงเวลาในการบำบัดตัวเองของแบคทีเรียรวมถึงสมมติฐานอื่นที่ประกอบในแบบจำลอง

Crockett ,Crabtree and Cluckie (1989) ในอังกฤษและเวลส์มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองคุณภาพน้ำในแม่น้ำเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการติดตั้งท่อและระบบระบายน้ำทั้งรวมทั้งการหาปริมาณการทิ้งน้ำที่เหมาะสม โดยในการพัฒนาแบบจำลองครั้งนี้ใช้แบบจำลองทั้งสิ้น 3 แบบจำลอง ได้แก่ TOMCAT เป็นแบบจำลองที่นำภาษา Fortran'77 ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถจำลองสภาพทุกชนิดของการไหลหรือการกระจายตัวของสารไหลรวมถึงความเข้มข้นของทุกจุดในแหล่งรับน้ำ อีกทั้งโปรแกรมนี้ยังสามารถคำนวณได้ในทุกฤดูกาล และมีการคำนวณอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนที่สุดใน 3 แบบจำลองนี้ แบบจำลองต่อมาคือ SIMCAT ซึ่งเขียนในรูปของ Fortran'66 โดยมีสมมติฐานว่า ข้อมูลที่นำเข้าแปรตามกันในรูปของ log-normal distribution พารามิเตอร์ที่พิจารณาได้แก่ คลอไรด์ บีโอดี แอมโมเนีย เมื่อทำการเปรียบเทียบเสร็จแล้วแบบจำลองนี้สามารถคำนวณปริมาณน้ำทิ้งที่จะนำมาซึ่งคุณภาพน้ำตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยประเมินการพัฒนาระบบบำบัด รวมถึงประมาณราคาของความปลอดภัยเมื่อต้องการคุณภาพน้ำตามต้องการ โดยใช้สมการทรงมวล (mass balance) ในการคำนวณตลอดลำน้ำ ทำให้ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางกลศาสตร์ของการบำบัดตัวเองของแม่น้ำ โดยโมเดลจะปรับเองอัตโนมัติ ทำให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองไม่แตกต่างจากค่าสังเกต และแบบจำลองสุดท้ายคือ STREAM เป็นแบบจำลองที่ค่อนข้างจำเพาะเจาะจงซึ่งเป็นแบบจำลองที่รวมกันของหลายโปรแกรม ส่วนประกอบของการคำนวณจะมี 8 วงจรของตำแหน่ง (8 digit location code) โดยใช้สมการทรงมวลและการบำบัดตัวเอง (Self-Purification Model) โดยสรุปได้ว่าโมเดลแต่ละโมเดลก็จะตอบสนองแต่ละความต้องการแตกต่างกันไป ถ้าสามารถนำแบบจำลองทั้ง 3 มารวมกันจะได้แบบจำลองที่เป็นประโยชน์มากในการจัดการคุณภาพน้ำในอนาคต

Little and Lauria (1989) กล่าวว่าในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการใช้แบบจำลองแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลนำเข้า ความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองและความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณ โดยความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนำเข้าและผลการคำนวณ พบว่าเกิดจากการสุ่มตัวอย่างของค่าสังเกตหรือการประมาณค่าข้อมูลนำเข้า ความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัดและความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ ส่วนความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเกิดขึ้นจากรูปแบบของฟังก์ชันเฉพาะที่ใช้ในแบบจำลอง โดยถ้าเป็นความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจะเป็นความคลาดเคลื่อนที่ไม่สามารถคาดเดาได้และยากที่จะแก้ไข ส่วนความคลาดเคลื่อนของผลจากการคำนวณจัดเป็นความคลาด

เคลื่อนที่พบบ่อย ๆ ซึ่งเกิดจากการลองผิดลองถูก (trial and error) คลาดเคลื่อนระหว่างค่าจากแบบจำลอง และค่าสังเกต ซึ่งในการใช้แบบจำลองต้องพยายามให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

Cubilo ,Rodriguez and Bornwell (1992) ใช้โปรแกรม QUAL 2E ในการวางแผนการจัดการคุณภาพน้ำแม่น้ำ MADRID ประเทศสเปน เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพน้ำที่ดีสำหรับกิจกรรมการพักผ่อน ซึ่งในการสร้างระบบบำบัดเกิดขึ้นเนื่องจาก คุณสมบัติของแม่น้ำเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง โดยในการศึกษาคุณภาพน้ำโดยใช้แบบจำลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การปรับเทียบ (Calibrate) กับข้อมูลที่มีซึ่งจะต้องถูกต้องและแม่นยำพอที่จะใช้ในการวางแผนและอีกขั้นตอนคือ การทดสอบค่าที่ได้จากการสำรวจ ส่วนข้อมูลที่ต้องการใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ เพื่อใช้คำนวณสภาพอุณหภูมิซึ่งมีความจำเป็นในพื้นที่ศึกษาเนื่องจากมีปัญหาความแตกต่างกันของอุทกวิทยาระหว่างทางตอนเหนือและตอนใต้ ทำให้เกิดปัญหาในการปรับเทียบอุณหภูมิ ออกซิเจนละลายในแบบจำลอง โดยพารามิเตอร์ที่พิจารณา ได้แก่ อุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย บีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและไฟโตแพลงตอน ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นตัววางแผนการขยายระบบบำบัดแบบจำลองจะใช้ในการคำนวณคุณภาพน้ำทุกกิโลเมตรตามระดับของระบบบำบัดน้ำเสีย ผลการใช้แบบจำลองพบว่า คุณภาพน้ำในแม่น้ำมีคุณภาพต่ำ ควรมีการปรับปรุงคุณภาพซึ่งมากกว่า 100 ppm ของบีโอดีในช่วงการไหลต่ำ อย่างน้อยในการลงทุนก่อสร้างระบบบำบัดต้องใช้การบำบัดขั้นที่ 2 (secondary treatment) ในจุดทิ้งน้ำเสียหลัก

Macsood (1996) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 เพื่อจัดการคุณภาพน้ำในแม่น้ำ RAVI ซึ่งเป็น 1 ในแม่น้ำสายหลักของประเทศปากีสถาน โดยแม่น้ำนี้เป็นแหล่งรองรับน้ำเสียจากระบบบำบัดที่ไม่เพียงพอของชุมชนและน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษา คือ การหาวิธีที่เหมาะสมในการพัฒนาคุณภาพน้ำให้ดีขึ้นตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ซึ่งการศึกษานี้ทำการปรับเทียบแบบจำลองทางชลศาสตร์ (HD Model) และแบบจำลองคุณภาพน้ำ (WQ Model) โดยในแบบจำลองคุณภาพน้ำพารามิเตอร์ที่เลือกพิจารณา คือ ออกซิเจนละลาย บีโอดีและอุณหภูมิ หลังจากผ่านการปรับเทียบแบบจำลองทั้ง 2 แล้วมีการจำลองการไหลโดยใช้อัตราการไหลต่ำสุดเฉลี่ยทุก 7 วัน ภายใน 10 ปีมาใช้คำนวณสภาพการไหลของแม่น้ำ แล้วนำผลการคำนวณดังกล่าวมาใช้คำนวณคุณภาพน้ำในแบบจำลองอีกครั้งเพื่อหาวิธีการที่จะจัดการคุณภาพน้ำในอนาคต ผลการศึกษาพบว่า ในปี 1997 ค่าบีโอดีของน้ำทิ้งไม่ควรเกินกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากทำให้ค่าออกซิเจนละลายต่ำสุดที่ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าน้ำทิ้งมีค่าบีโอดี 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องมีน้ำในแม่น้ำต่ำสุด 25 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จึงจะได้คุณภาพน้ำตามมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดไว้ คือ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนด้านการสร้างระบบบำบัด พบว่า ถ้ามีการถ่ายเทน้ำเสียของเมือง Lahore ไปที่ท้ายน้ำซึ่งมีการเจือจางได้มากกว่า โดยทำคลองเชื่อมมาที่ท้ายน้ำจะทำให้ลดระดับของการบำบัดเมื่อเทียบกับการสร้างระบบบำบัดที่ต้นน้ำ