

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กีรติ ลีวัจนกุล. ม.ป.ป. ชลศาสตร์. ปทุมธานี: SPEC.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2545. การสำรวจความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำเพื่อการจัดการมลพิษจากกิจกรรมขนาดเล็กในพื้นที่อนุรักษ์น้ำดิบเพื่อการประปา.

กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2540. โครงการจัดการคุณภาพน้ำและจัดทำแผนปฏิบัติการในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคกลาง. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2537. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.

ฉัตรไชย รัตนไชย. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทิววงศ์ ศรีบุรี. 2541. การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการคุณภาพน้ำในลำน้ำธรรมชาติ. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นฤมล สังขประดิษฐ์. 2541. การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 ในการคาดการณ์คุณภาพน้ำแม่น้ำแม่กลองตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวด. 2543. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัฒนาที่ดิน, กรม. 2542. แผนการใช้ที่ดินลุ่มน้ำสาขาที่ราบแม่น้ำแม่กลอง. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พิทักษ์ ยิวานนท์. 2547. การระบายน้ำท้ายเขื่อนแม่กลองกับคุณภาพน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เมธาพันธ์ ชาลีกุล. 2539. แนวทางการจัดการน้ำสำหรับการวางแผนพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรารักษ์ ทนงค์ศักดิ์. 2547. การประเมินภาระมลพิษในลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วริยา มิตดา. 2547. การประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อประเมินความสามารถในการรองรับของเสียสูงสุดรายวันของปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีในแม่น้ำยมจังหวัดแพร่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อมภาควิชาอนุรักษ์วิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิทธิชัย ดันธนะสุทธิ. 2547. ศักยภาพของการพัฒนาลุ่มน้ำที่มีต่อคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำแม่กลอง. กรุงเทพมหานคร: คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- Cubilo, F., Rodrigues, and Bornwell. 1992. A system for control of river water quality for the community of MADRID using QUAL2E. Journal of Water Quality International 26: 1867-1872.
- Delaware Department of Natural Resources and Environmental Control. 1998. Total Maximum Daily Load (TMDL) Analysis for Nanticoke River and Broad Creek Delaware. Dover: DNREC.
- Donnell, B. P., Letter, J. V., and McAnally, W. H. 2003. Users Guide for RMA2 Version 4.5. New York: Wex Tech Systems, Inc.
- Kang, M. S., Park, S. W., Lee, J. J., and Yoo, K. H. 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. Agricultural water management 79: 72-92.
- Letter, J. V., and Donnell, B. P. 2003. Users Guide for RMA4 Version 4.5. New York: Wex Tech Systems, Inc.
- Lung, W. S. 2001. Water Quality Modeling for Wasteload Allocations and TMDLs. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Palmer, M. D. 2001. Water Quality Modeling. Washington, D.C.: The World Bank.
- Rinaldi, S., Soncini-Sessa, R, Stehfest, H., and Tamura, H. 1979. Modeling and Control of River Quality. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- United State Environmental Protection Agency. 2000. Total Maximum Daily Load (TMDL) Development for Dissolve Oxygen in the Ogeechee River. Georgia: USEPA.
- Wang, P. F., Martin, J., and Morrison, G. 1999. Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida. Estuarine, Coastal and Shelf Science 49: 1-20.

Wool, T. A., Ambrose, R. B., Martin, J. L., Comer, E. A., USEPA, Environmental Research Laboratory Athens, USACE-Waterways Experiment Station Vicksburg, and Tetra Tech, Inc. n.d. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6.0 Draft: User's Manual. Georgia: USEPA.

Wright, R.M., McDonnell, A.J. 1979. In-Stream Deoxygenation Rate Prediction. Journal of the Environmental Engineering Division Vol.15 No.2: 323-335.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ดัชนีคุณภาพน้ำ ¹	หน่วย	ค่าทางสถิติ	เกณฑ์กำหนดสูงสุด ² ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์				
			ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท3	ประเภท4	ประเภท5
1.สี กลิ่นและรส (Colour,Odour and Taste)	-	-	๓	๓'	๓'	๓'	-
2.อุณหภูมิ (Temperature)	°ซ	-	๓	๓'	๓'	๓'	-
3.ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	-	๓	5-9	5-9	5-9	-
4.ออกซิเจนละลาย (DO) ²	มก./ล.	P20	๓	6.0	4.0	2.0	-
5.บีโอดี (BOD)	มก./ล.	P80	๓	1.5	2.0	4.0	-
6.แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)	เอ็ม.พี.เอ็น/100 มล.	P80	๓	5,000	20,000	-	-
7.แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bateria)	เอ็ม.พี.เอ็น/100 มล.	P80	๓	1,000	4,000	-	-
8.ไนเตรด (NO3)ในหน่วยไนโตรเจน	มก./ล.	-	๓	5.0			-
9.แอมโมเนีย (NH3)ในหน่วยไนโตรเจน	มก./ล.	-	๓	0.5			-
10.ฟีนอล (Phenols)	มก./ล.	-	๓	0.005			-
11.ทองแดง (Cu)	มก./ล.	-	๓	0.1			-
12.นิกเกิล (Ni)	มก./ล.	-	๓	0.1			-
13.แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	-	๓	1.0			-
14.สังกะสี (Zn)	มก./ล.	-	๓	1.0			-
15.แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	-	๓	0.005* 0.05**			-
16.โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr Hexavalent)	มก./ล.	-	๓	0.05			-

ดัชนีคุณภาพน้ำ ^{1/}	หน่วย	ค่าทางสถิติ	เกณฑ์กำหนดสูงสุด ^{2/} ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์				
			ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท3	ประเภท4	ประเภท5
17.ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	-	๓		0.05		-
18.ปรอททั้งหมด (Total Hg)	มก./ล.	-	๓		0.002		-
19.สารหนู (As)	มก./ล.	-	๓		0.01		-
20.ไซยาไนด์ (Cyanide)	มก./ล.	-	๓		0.005		-
21.กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) -ค่ารังสีแอลฟา (Alpha) -ค่ารังสีเบตา(Beta)	เบคเคอเรล/ล.	-	๓		0.1 1.0		-
22.สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด (Total Organochlorine Pesticides)	มก./ล.	-	๓		0.05		-
23.ดีดีที (DDT)	ไมโครกรัม/ล.	-	๓		1.0		-
24.บีเอชซีชนิดแอลฟา (Alpha-BHC)	ไมโครกรัม/ล.	-	๓		0.02		-
25.ดิลดริน (Dieldrin)	ไมโครกรัม/ล.	-	๓		0.1		-
26.อัลดริน (Aldrin)	ไมโครกรัม/ล.	-	๓		0.1		-
27.เฮปตาคลอร์และเฮปตาคลออีพอกไซด์ (Heptachor & Heptachlorepoxide)	ไมโครกรัม/ล.	-	๓		0.2		-
28.เอนดริน (Endrin)	ไมโครกรัม/ล.	-			ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด		-

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549)

หมายเหตุ:

- ^{1/}กำหนดค่าเฉพาะในแหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 สำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 1 ให้เป็นไปตามธรรมชาติ และแหล่งน้ำประเภทที่ 5 ไม่กำหนดค่า

- ^{2/}ค่า DO เป็นเกณฑ์มาตรฐานต่ำสุด
- ๓ เป็นไปตามธรรมชาติ
- ๓' อุณหภูมิของน้ำจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกิน 3 องศาเซลเซียส
- *น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO₃ ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- **น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ CaCO₃ เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- P 20 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 20 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง
- P 80 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 80 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง
- วิธีการตรวจสอบเป็นไปตามวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ซึ่ง APHA : American Public Health Association ,AWWA : American Water Works Association และ WPCF : Water Pollution Control Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนด

ตารางที่ ก.2 ประเภทคุณภาพน้ำผิวดิน

ประเภทแหล่งน้ำ	การใช้ประโยชน์
ประเภทที่ 1	<p>ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ</p> <p>(1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน</p> <p>(2) การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน</p> <p>(3) การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ</p>
ประเภทที่ 2	<p>ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ</p> <p>(1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน</p> <p>(2) การอนุรักษ์สัตว์น้ำ</p> <p>(3) การประมง</p> <p>(4) การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ</p>

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ประเภท แหล่งน้ำ	การใช้ประโยชน์
ประเภทที่ 3	<p>ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ</p> <p>(1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน</p> <p>(2) การเกษตร</p>
ประเภทที่ 4	<p>ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ</p> <p>(1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน</p> <p>(2) การอุตสาหกรรม</p>
ประเภทที่ 5	<p>ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม</p>

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549)

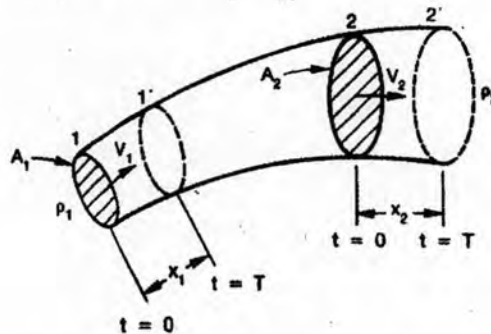
ภาคผนวก ข

แบบจำลองอุทกศาสตร์พื้นฐาน

ข.1 หลักชลศาสตร์ (Principle of Hydraulics) (กิริติ ลีวัจนกุล, ม.ป.ป.)

ข.1.1 สมการการไหลต่อเนื่อง (continuity equation)

สมการการไหลต่อเนื่องเป็นสมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความเร็ว และพื้นที่หน้าตัดการไหล ซึ่งการวิเคราะห์สมการการไหลต่อเนื่องจะใช้ หลักการอนุรักษ์มวลสาร (conservation of mass) กล่าวคือ มวลสารไม่มีทางสูญหายหรือเพิ่มขึ้นได้ แต่มวลสารสามารถเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งได้



ภาพที่ ข.1 การไหลแบบต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลดังภาพที่ ข.1

เมื่อให้ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2

V_1 และ V_2 คือ ความเร็วของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2

ρ_1 และ ρ_2 คือ ความหนาแน่นของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2

ที่เวลา $t=0$ ของไหลอยู่ที่ตำแหน่ง 1 - 2 มีมวล (1 - 2)

ที่เวลา $t=T$ ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ตำแหน่ง 1' - 2' มีมวล (1' - 2')

จากหลักการอนุรักษ์มวลสาร มวลของของไหลไม่มีการสูญหายหรือเพิ่มขึ้น
ดังนั้น

$$\text{มวลของไหล (1 - 2)} = \text{มวลของไหล (1' - 2')} \quad (1)$$

เมื่อนำมวลของไหล (1' - 2) ลบสมการที่ 1 ทั้งสองข้าง จะได้

มวลของไหล (1 - 1') = มวลของไหล (2 - 2')

$$m_1 = m_2$$

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$$

$$\rho_1 A_1 x_1 = \rho_2 A_2 x_2 \quad (2)$$

หารสมการที่ 2 ด้วย เวลา T ทั้งสองข้างจะได้

$$\rho_1 A_1 \frac{x_1}{T} = \rho_2 A_2 \frac{x_2}{T}$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (3)$$

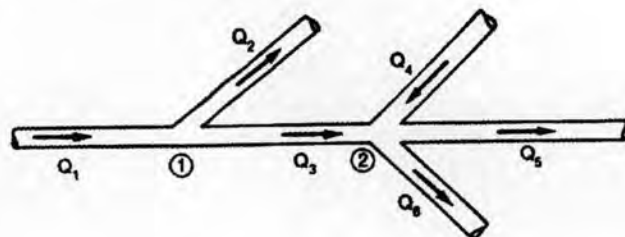
สมการที่ 3 คือ สมการการไหลต่อเนื่องในกรณีที่มีความหนาแน่นของของไหลทั้งสองด้านไม่เท่ากัน เช่น อุณหภูมิทั้งสองด้านไม่เท่ากัน ทำให้มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน หรือในกรณีที่ด้านเหนือของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นน้ำจืด และด้านท้ายน้ำบริเวณใกล้อ่าวไทยเป็นน้ำเค็ม ทำให้มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เป็นต้น

สำหรับของไหลอัดตัวได้ยาก (incompressible fluid) และมีอุณหภูมิคงที่ จะมีความหนาแน่น $\rho_1 = \rho_2$ ดังนั้น จากสมการที่ 3 จะได้สมการการไหลต่อเนื่อง คือ

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (4)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหล (discharge หรือ volume flow rate หรือ volume flux) มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา หมายถึง ปริมาตรของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เช่น น้ำไหลผ่านสะพานพระราม 9 ด้วยอัตราการไหล 800 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s หรือ cms) แปลว่า ใน 1 วินาที มีปริมาณน้ำไหลผ่าน 800 ลูกบาศก์เมตร เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออกที่จุดเชื่อมต่อของของไหล (node or junction) ดังภาพที่ ข.2



ภาพที่ ข.2 การไหลคงที่ที่จุดเชื่อมต่อ

ผลรวมของอัตราการไหลเข้า = ผลรวมของอัตราการไหลออก

ที่จุด 1 มี $\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$ (5)
 ที่จุด 2 มี $Q_1 = Q_2 + Q_3$
 $Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6$

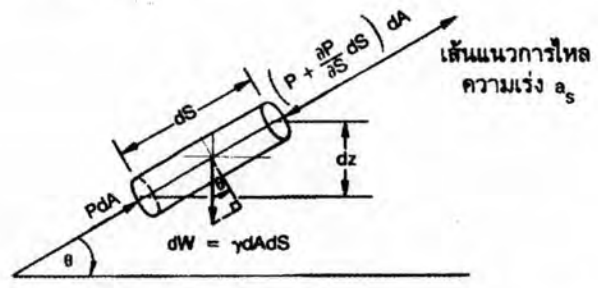
ข.1.2 สมการพลังงาน (energy equations)

สมการพลังงาน เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับงานที่ต้องการหาความดัน ความเร็ว ระดับ ความลึก และการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหล มักจะใช้คู่กับสมการการไหลต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการหาอัตราการไหล ความเร็ว หน้าตัดการไหล และความลึกของการไหล เป็นต้น

แนวความคิดเกี่ยวกับสมการพลังงาน ในขั้นต้นอาศัยสมการของ Leonhard Euler ที่ได้มีการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างระดับ ความดัน และความเร็วของการไหลตามเส้นแนวการไหลซึ่ง Bernoulli ได้วิเคราะห์ต่อจนเป็นสมการพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนี้

ข.1.2.1 สมการของ Leonhard Euler

พิจารณาเส้นแนวการไหลของของไหลกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว a_s ทำมุม θ กับแนวราบ ดังในภาพที่ ข.3



ภาพที่ ข.3 การเคลื่อนที่ของของไหลตามเส้นแนวการไหล

แรงที่กระทำต่อชิ้นของไหลประกอบด้วย

- 1) แรงดัน (pressure force) เนื่องจากความดัน P ด้านหนึ่ง และความดัน $P + \frac{\partial P}{\partial s} ds$ อีกด้านหนึ่งของชิ้นการไหล
- 2) แรงเนื่องจากน้ำหนักของชิ้นการไหล
 น้ำหนักของชิ้นการไหล = $dW = \gamma V = \gamma dA ds$ (6)

แรงย่อยของน้ำหนักของชิ้นของไหลตามทิศทางการไหล

$$dW \sin\theta = \gamma dAdS \sin\theta \quad (7)$$

ความเร่งของของไหล $a_s = \frac{dV}{dt}$

แต่ความเร็ว $V = f(S,t)$

เมื่อ S,t คือ ระยะทางและเวลาตามลำดับ

ดังนั้น ความเร่ง $a_s = \frac{\partial V}{\partial S} \frac{dS}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \frac{dt}{dt}$

$$a_s = V \frac{\partial V}{\partial S} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (8)$$

ในการไหลคงที่ (steady flow) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเวลา

ดังนั้น ความเร่ง $a_s = V \frac{\partial V}{\partial S}$ (9)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้

$$\Sigma F = ma$$

หรือ $PdA - \left[P + \frac{\partial P}{\partial S} dS \right] dA - dW \sin\theta = ma$

$$PdA - \left[P + \frac{\partial P}{\partial S} dS \right] dA - \gamma dAdS \left[\frac{dz}{dS} \right] = \rho dAdS \left[V \frac{\partial V}{\partial S} \right]$$

$$dz + \frac{dP}{\gamma} + \frac{VdV}{g} = 0 \quad (10)$$

สมการที่ 10 คือสมการ Leonhard Euler

ข.1.2.2 สมการ Bernoulli

จากสมการพลังงานของ Leonhard Euler สามารถอินทิเกรตได้ดังนี้

$$\int dz + \int \frac{dP}{\gamma} + \int \frac{VdV}{g} = 0$$

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (11)$$

สมการที่ 11 คือสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้สำหรับเงื่อนไขในการไหลของของไหลดังนี้

- 1) ของไหลจินตภาพ (ideal) คือ ของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทาน และอัดตัวได้ยาก (incompressible)
- 2) การไหลคงที่ตามเวลา (steady flow) และเป็นกรไหลอย่างต่อเนื่อง
- 3) การไหลเป็นไปตามเส้นแนวการไหล
- 4) ความเร็วกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหลและมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ย
- 5) แรงที่กระทำต่อของไหลมีเพียงแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และแรงดัน (pressure force) เท่านั้น

ทุกเทอมในสมการ Bernoulli มีมิติเป็นความยาว (L) ดังตารางที่ ข.1 ตารางที่ ข.1 เทอมต่างๆ ในสมการพลังงานของ Bernoulli

เทอม	ชื่อเรียก	มิติ
Z	หัวศักดา (potential head หรือ elevation head)	L
$\frac{P}{\gamma}$	หัวความดัน (pressure head)	$\frac{F L^3}{L^2 F} = L$
$\frac{V^2}{2g}$	หัวความเร็ว (velocity head)	$\frac{L^2 T^2}{T^2 L} = L$

หมายเหตุ F คือ แรงหรือน้ำหนัก

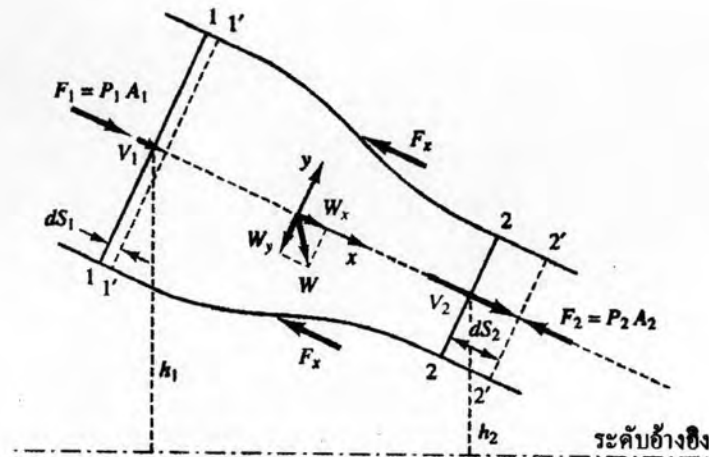
L คือ ความยาว

T คือ เวลา

ข.1.3 สมการโมเมนตัม (momentum equation)

เมื่อมีการไหลผ่านโครงสร้างทางชลศาสตร์ เช่น การไหลผ่านฝายน้ำล้น ประตูน้ำ ข้อต่อ ท่อลดขนาด ข้อต่อท่อเพิ่มขนาด และข้องอของท่อ เป็นต้น จะเกิดแรงกระแทกเนื่องจากโมเมนตัมของของไหลกระทำต่อโครงสร้างที่รับแรง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาแรงจากการเคลื่อนที่ของของไหลโดยใช้สมการโมเมนตัมอย่างง่าย เพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล

การหาแรงจากการเคลื่อนที่ของของไหลโดยใช้สมการโมเมนตัมอย่างง่ายสามารถทำได้โดยพิจารณาการไหลของของไหลในท่อดังภาพที่ ข.4 ในปริมาตรควบคุม (control volume) ที่เวลาเริ่มต้น ของไหลอยู่ระหว่างหน้าตัด 1 - 1 กับ 2 - 2 เมื่อเวลาผ่านไป dt ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ระหว่างหน้าตัด 1' - 1' กับ 2' - 2'



ภาพที่ ข.4 การหาสมการโมเมนตัม

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน เมื่อมวลของไหลเคลื่อนที่ในปริมาตรควบคุม จะมี

$$\begin{aligned}\sum \vec{F} &= m\vec{a} \\ &= m \frac{d\vec{V}}{dt} \\ &= \frac{m\vec{V}_2 - m\vec{V}_1}{\nabla t} \\ \sum \vec{F} &= \frac{m(\vec{V}_2 - \vec{V}_1)}{\nabla t}\end{aligned}\quad (12)$$

ทั้งแรง \vec{F} และความเร็ว \vec{V} เป็นปริมาณเวกเตอร์

เนื่องจาก ความหนาแน่น $\rho = \frac{m}{\nabla}$

หรือ $m = \rho \nabla$ (13)

แทนค่า m จากสมการที่ 13 ในสมการที่ 12 จะได้

$$\sum F = \frac{\rho \nabla (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)}{\nabla t} \quad (14)$$

เมื่อ $\frac{\nabla}{\nabla t}$ คือ ปริมาตรของไหลที่มีการไหลใน 1 หน่วยเวลา หมายถึงอัตราการไหล Q

ดังนั้น แทนค่า $\frac{\nabla}{\nabla t} = Q$ ในสมการที่ 14 จะได้

$$\sum \bar{F} = \rho Q (\bar{v}_2 - \bar{v}_1) \quad (15)$$

แนวแกน x มี $\sum F_x = \rho Q (v_{2x} - v_{1x}) \quad (16)$

แนวแกน y มี $\sum F_y = \rho Q (v_{2y} - v_{1y}) \quad (17)$

แนวแกน z มี $\sum F_z = \rho Q (v_{2z} - v_{1z}) \quad (18)$

แรงภายนอก (external forces) ที่กระทำกับปริมาตรควบคุมตามแนวแกน x หาได้จาก

$$\begin{aligned} \sum F &= F_1 - F_2 - F_x + W_x \\ \sum F &= P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_x + W_x \end{aligned} \quad (19)$$

โดยที่ F_1 และ F_2 คือ แรงดันของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ
 P_1 และ P_2 คือ ความดันของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ
 A_1 และ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ
 V_1 และ V_2 คือ ความเร็วของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 ตามลำดับ
 F_x คือ แรงต้านการไหลที่ผนังท่อ
 W_x คือ น้ำหนักของไหลตามแนวแกน x

ข.1.4 การไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow)

ข.1.4.1 การไหลในทางน้ำเปิด

การไหลในทางน้ำเปิด หมายถึง การไหลที่มีผิวของของไหลสัมผัสกับอากาศ ซึ่งเรียกผิวของของไหลนี้ว่า ผิวของของไหลอิสระ โดยมีความดันบรรยากาศ

(atmospheric pressure) กระทบต่อผิวของไหลอิสระ ดังนั้น ผิวของไหลอิสระตามแนวยาวของทางน้ำเปิดจึงเป็นเส้นระดับชลศาสตร์ (hydraulic grade line) ทางน้ำเปิดที่พบเห็นโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

ข.1.4.1.1 ทางน้ำเปิดตามธรรมชาติ (natural open channel)

เป็นทางน้ำเปิดที่มีสภาพสลับซับซ้อน เปลี่ยนแปลงไปตามสถานที่ ลักษณะไม่แน่นอน เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ร่องน้ำ คู คลอง และแม่น้ำ เป็นต้น

ข.1.4.1.2 ทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น (artificial channel)

เป็นทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ซึ่งการวางแผนทางการไหลสามารถกำหนดได้จากเส้นระดับชั้นความสูง (contour) ของพื้นที่ โดยอาศัยหลักการที่ว่าของไหลย่อมไหลจากที่ที่มีพลังงานสูงไปสู่ที่ที่มีพลังงานต่ำกว่าตามแรงโน้มถ่วงของโลก ตัวอย่างของทางน้ำเปิดที่สร้างขึ้น เช่น คลองคอนกรีต รางระบายน้ำข้างถนน รางคอนกรีตเสริมเหล็ก และท่อที่มีน้ำไหลไม่เต็มท่อ เป็นต้น

ข.1.4.2 ประเภทของการไหลในทางน้ำเปิด

ในทางชลศาสตร์สามารถแบ่งการไหลในทางน้ำเปิดได้ 2 ประเภท คือ การแบ่งตามชนิดของการไหล (type of flow) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ข.1.4.2.1 การแบ่งตามชนิดของการไหล

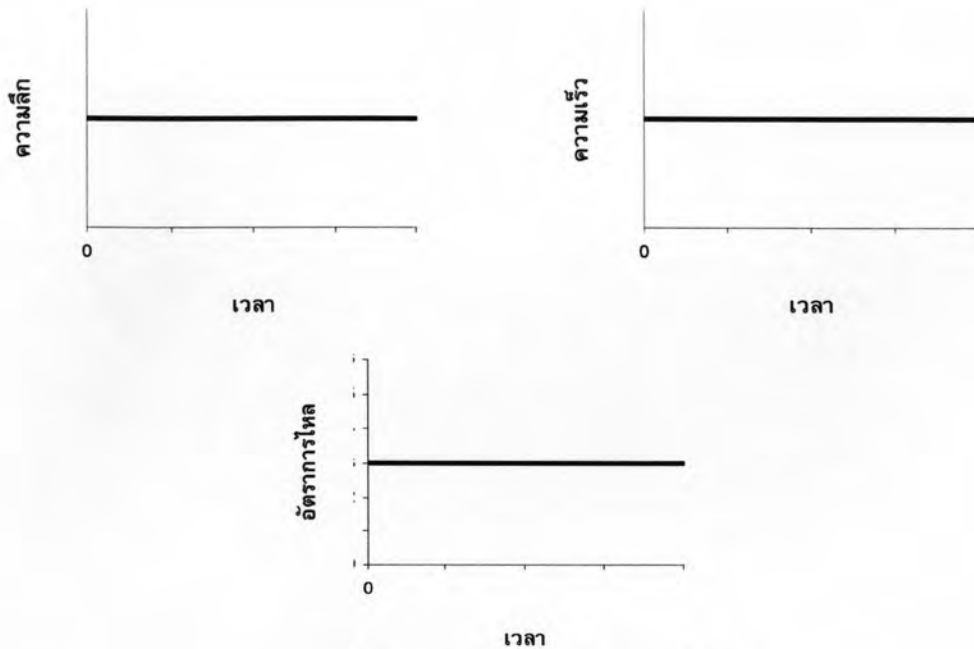
มีหลักเกณฑ์ในการแบ่ง 2 ประการ คือ

1) เกณฑ์เกี่ยวกับเวลา (time criterion) มี 2 ลักษณะ คือ

- การไหลคงที่ (steady flow) คือ การไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือ ตัวแปรต่างๆ ของการไหล เช่น ความลึก (y) ความเร็ว (V) และอัตราการไหล (Q) ที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของทางน้ำเปิดคงที่ในช่วงเวลาที่กำหนด (dt) หรือ

$$\frac{d}{dt}(y, V, Q, \dots) = 0 \quad (20)$$

ลักษณะการไหลคงที่ มักจะเกิดในทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้น เพราะสามารถควบคุมปริมาณการไหลคงที่ได้ด้วยประตูน้ำต่างๆ ส่วนทางน้ำเปิดตามธรรมชาติก็อาจเกิดการไหลคงที่ได้ในกรณีที่พิจารณาการไหลในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นภาพของสมการที่ 20 สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ ข.5

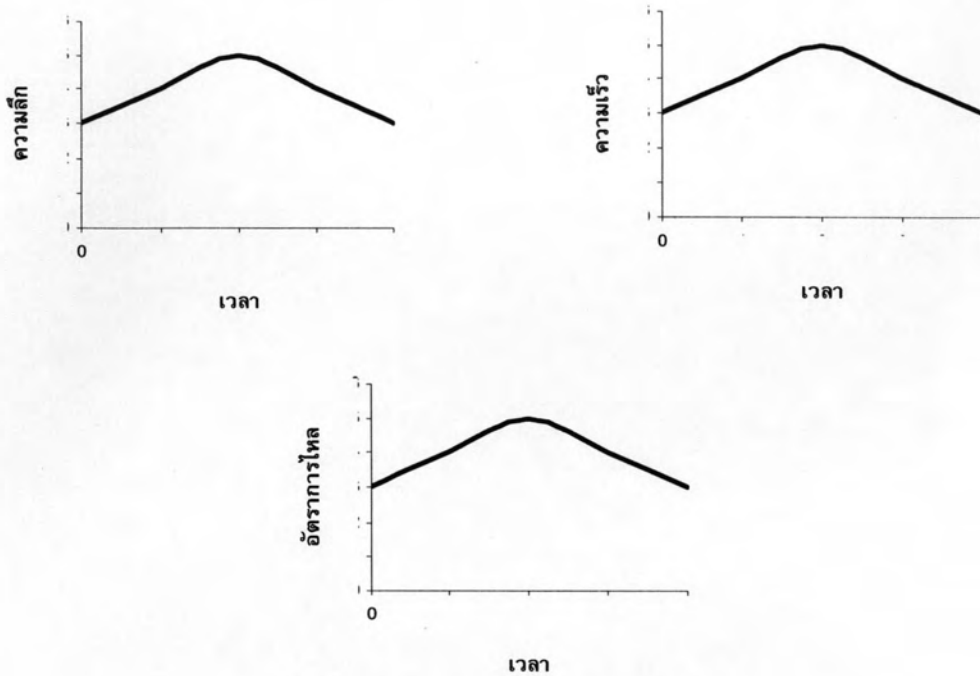


ภาพที่ ข.5 การไหลคงที่ในทางน้ำเปิด

- การไหลไม่คงที่ (unsteady flow) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือ ตัวแปรต่างๆ ของการไหล เช่น ความลึก (y) ความเร็ว (V) และอัตราการไหล (Q) ที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของทางน้ำเปิดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือ

$$\frac{d}{dt}(y, V, Q, \dots) \neq 0 \quad (21)$$

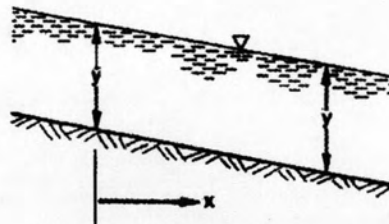
ลักษณะการไหลไม่คงที่ มักจะเกิดขึ้นกับทางน้ำเปิดธรรมชาติ ซึ่งมีความผันแปรของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาก โดยปริมาณน้ำที่ไหลลงทางน้ำเปิด ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณน้ำฝน การซึมลงดิน การกักขังบนผิวดิน และการระเหย เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความลึก ความเร็ว และอัตราการไหลในทางน้ำเปิด ส่วนในทางน้ำเปิดที่มนุษย์สร้างขึ้นก็เกิดการไหลไม่คงที่ได้ เช่น ปริมาณน้ำที่ปล่อยจากเขื่อนสู่คลองชลประทานเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ควบคุม หรือการผันน้ำจากคลองชลประทานไปใช้ก็จะทำให้เกิดการไหลไม่คงที่ได้ ดังนั้นภาพของสมการที่ 21 สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ ข.6



ภาพที่ ข.6 การไหลไม่คงที่ในทางน้ำเปิด

2) เกณฑ์เกี่ยวกับตำแหน่งพื้นที่การไหล (space criterion) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- การไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) คือการไหลที่มีความลึกของการไหล (y) คงที่ ตลอดระยะทาง (x) ของทางน้ำเปิด ดังภาพที่ ข.7



ภาพที่ ข.7 การไหลแบบสม่ำเสมอ

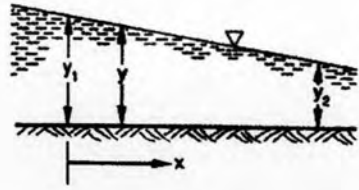
จากภาพที่ ข.7 จะเห็นได้ว่า ความลึก (y) ไม่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง (x) หรือ

$$y \neq f(x) \quad (22)$$

นั่นคือ

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad (23)$$

- การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (varied flow) หรือ การไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform flow) คือการไหลที่มีความลึกของของไหลเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของทางน้ำเปิด ดังภาพที่ ข.8



ภาพที่ ข.8 การไหลแบบเปลี่ยนแปลง

จากภาพที่ ข.8 จะเห็นได้ว่า ความลึก (y) เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง (x) หรือ

$$y = f(x) \tag{24}$$

นั่นคือ

$$\frac{dy}{dx} \neq 0 \tag{25}$$

นอกจากนี้ในการไหลแบบเปลี่ยนแปลงยังแบ่งได้อีก 2 ชนิด คือ

- i) การไหลแบบเปลี่ยนแปลงน้อย (gradually varied flow; GVF) คือ การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกตามระยะทางน้อย
- ii) การไหลแบบเปลี่ยนแปลงเร็ว (rapidly varied flow; RVF) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกตามระยะทางอย่างทันทีทันใด เช่น น้ำกระโดด (hydraulic jump) น้ำตก (hydraulic drop) และบริเวณที่น้ำลोटไหลจากประตูระบายน้ำ เป็นต้น

ข.1.4.2.2 การแบ่งตามสภาวะการไหล

จะพิจารณาผลของแรงกระทำที่เกี่ยวข้องกับการไหล 3 ชนิด คือ แรงเนื่องจากความหนืด (viscous force) แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และแรงเนื่องจากความเฉื่อยของมวล (inertia force) โดยมีผลของแรงต่างๆ ดังนี้

- 1) ผลของแรงเนื่องจากความหนืด เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเนื่องจากความเฉื่อยของมวลจะได้ Reynolds number* (N_r) ดังนี้

* Reynolds number (N_r) คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล (viscous force)

$$N_r = \frac{VR}{V} \quad (26)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของการไหลในทางน้ำเปิด

R คือ รัศมีชลศาสตร์ หาได้จากพื้นที่หน้าตัดการไหลหารด้วยเส้นของเปียกของทางน้ำเปิด

V คือ ความหนืดเปรียบเทียบ

จากผลการทดลอง การทดสอบ และตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ 26 ทั้งในห้องปฏิบัติการ และสภาพแม่น้ำจริง พบว่า ผลของแรงเนื่องจากความหนืดสามารถแบ่งสภาวะการไหลในทางน้ำเปิดได้ 3 ประเภท คือ

i) การไหลแบบราบเรียบ (lamina flow) คือ การไหลที่มีการเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ มีแรงกระทำเนื่องจากความหนืดมาก โดยมีค่า Reynolds number น้อยกว่า 500

ii) การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) คือ การไหลที่มีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ สายน้ำปั่นป่วน วกวนไม่แน่นอน มีแรงกระทำเนื่องจากความหนืดน้อย โดยมีค่า Reynolds number มากกว่า 2000

iii) การไหลแบบผสม (transitional flow) คือ การไหลที่ผสมกันอยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีค่า Reynolds number อยู่ระหว่าง 500 ถึง 2000

2) ผลของแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อเปรียบเทียบกับแรงเนื่องจากความเฉื่อยของมวล จะได้ค่า Froude number* (F_r) คือ

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (27)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของการไหลในทางน้ำเปิด

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

D คือ ความลึกชลศาสตร์ (hydraulic depth) หาได้จากพื้นที่หน้าตัดการไหลหารด้วยความกว้างของผิวของของไหลอิสระบนหน้าตัดการไหล

* Froude number (F_r) คือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล (viscous force)

จากผลการทดสอบการไหลในทางน้ำเปิด พบว่า ผลของแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกสามารถแบ่งสภาวะการไหลในทางน้ำเปิดได้ 3 ประเภท คือ

i) การไหลวิกฤต (critical flow) คือ การไหลที่มีค่า Froude number เท่ากับ 1 มีความลึกเท่ากับความลึกวิกฤต และความเร็วเท่ากับความเร็ววิกฤต

ii) การไหลใต้วิกฤต (subcritical flow) คือ การไหลที่มีการไหลอย่างช้าๆ ความลึกมากกว่าความลึกวิกฤต โดยมีค่า Froude number น้อยกว่า 1

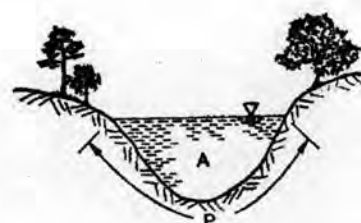
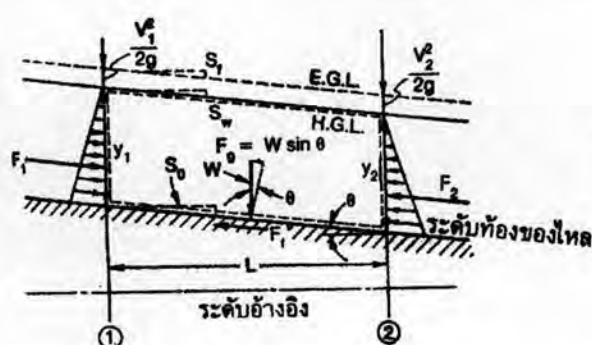
iii) การไหลเหนือวิกฤต (supercritical flow) คือ การไหลที่มีการไหลเร็ว ความลึกน้อยกว่าความลึกวิกฤต โดยมีค่า Froude number มากกว่า 1

ข.1.4.3 การไหลแบบสม่ำเสมอ

การไหลในทางน้ำเปิดเป็นการเคลื่อนที่ของของไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จากที่ที่มีพลังงานสูงไปสู่บริเวณที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งขณะที่ของไหลเคลื่อนที่จะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากมีแรงเสียดทานในบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับทางน้ำเปิด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการไหล ซึ่งการไหลแบบสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นเมื่อแรงเสียดทานเท่ากับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก โดยที่การไหลแบบสม่ำเสมอนี้บางครั้งเรียกว่า การไหลแบบปกติ (normal flow) การไหลแบบสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นเมื่อ

1) คุณสมบัติทางเรขาคณิตและสภาพการไหลในทางน้ำเปิด คือ ความลึก หน้าตัดลำน้ำ อัตราการไหล และความเร็ว คงที่ทุกหน้าตัดการไหล

2) ความลาดของระดับท้องของของไหล (bottom slope; S_0) ความลาดผิวของของไหล (surface slope; S_w) ความลาดของเส้นระดับพลังงาน (energy grade line; S_f) มีค่าเท่ากัน และเท่ากับความลาด (S) ตลอดช่วงความยาวที่เกิดการไหลแบบสม่ำเสมอ ซึ่งในทางน้ำเปิดจะมีสภาพการไหลแบบสม่ำเสมอได้ถ้าไม่มีความเร่ง (acceleration) หรือความหน่วง (deceleration) ในแต่ละหน้าตัดการไหล แสดงว่า สภาพการไหลแบบสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อแรงโน้มถ่วงของโลกในทิศทางของการไหลมีค่าเท่ากับแรงเสียดทานของการไหล



ภาพที่ ข.9 การไหลแบบสม่ำเสมอในทางน้ำเปิด

เมื่อพิจารณาภาพตัดอิสระ (free-body diagram) ของการไหลแบบสม่ำเสมอระหว่างหน้าตัด 1 กับหน้าตัด 2 ดังภาพที่ ข.9 พบว่า มีแรงกระทำต่อของไหล 3 ชนิด คือ

i) แรงดันสถิต (hydrostatic pressure force) F_1 และ F_2 กระทำต่อของไหลทั้งสองหน้าตัด

ii) น้ำหนักของของไหล (W) หมายถึง แรงโน้มถ่วงของโลก สามารถแยกเป็นแรงในทิศทางการไหล (F_g) คือ

$$\begin{aligned} F_g &= W \sin \theta = \gamma \nabla \sin \theta \\ F_g &= \gamma AL \sin \theta \end{aligned} \quad (28)$$

โดยที่ γ คือ น้ำหนักจำเพาะของของไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

L คือ ระยะทางการไหล

$\sin \theta$ คือ ความลาดของระดับท้องของของไหล

ซึ่งในกรณีที่ θ มีค่าน้อย จะมีผลให้ $\sin \theta \approx \tan \theta \approx S$

ดังนั้น จากสมการที่ 28 จะได้

$$F_g = \gamma ALS \quad (29)$$

iii) แรงเสียดทานของการไหล (resistance force; F_f) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับผนังทางน้ำเปิดหาได้จาก

$$F_f = \tau_0 PL \quad (30)$$

โดยที่ τ_0 คือ ความเค้นเฉือนที่ผนังทางน้ำเปิด (wall shear stress) หมายถึงแรงเสียดทานต่อพื้นที่ที่ของไหลสัมผัสทางน้ำเปิด

P คือ เส้นขอบเปียก (wetted perimeter)

L คือ ระยะทางการไหล

ในปี ค.ศ.1773 Antoine Chezy วิศวกรชาวฝรั่งเศส พบว่า ความเค้นเฉือนที่ผนังทางน้ำเปิด (τ_0) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดการไหล (V) ยกกำลังสอง

$$\begin{aligned}\tau_0 &\propto V^2 \\ \tau_0 &= KV^2\end{aligned}\quad (31)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่

แทนค่า τ_0 จากสมการที่ 31 ลงในสมการที่ 30 จะได้

$$F_f = KV^2 PL \quad (32)$$

ผลรวมของแรงทั้ง 3 ชนิดในแนวการไหล คือ

$$F_1 + F_g - F_2 - F_f = 0 \quad (33)$$

เนื่องจากการไหลแบบสม่ำเสมอ ความลึกของของไหลที่หน้าตัด 1 เท่ากับหน้าตัด 2 ทำให้มีแรงดันสถิต $F_1 = F_2$ ดังนั้น จากสมการที่ 33 จะได้

$$F_g = F_f \quad (34)$$

จากสมการที่ 34 แสดงว่า แรงโน้มถ่วงของโลกในทิศทางการไหล เท่ากับแรงเสียดทานของของไหล ซึ่งเมื่อแทนค่า F_g จากสมการที่ 29 และ F_f จากสมการที่ 32 ในสมการที่ 34 จะได้

$$\gamma ALS = KV^2 PL$$

หรือ

$$V = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{K}\right)\left(\frac{A}{P}\right)S}$$

$$V = C\sqrt{RS} \quad (35)$$

โดยที่ $R = \frac{A}{P}$ คือ รัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius)

$C = \sqrt{\frac{\gamma}{K}}$ คือ สัมประสิทธิ์ของ Chezy ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพทางน้ำเปิด และสภาพการ

ไหล

สมการที่ 35 เป็นสมการที่ Antoine Chezy ได้เสนอและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ซึ่งสมการนี้เป็นสมการการไหลแบบสม่ำเสมอที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) รัศมีชลศาสตร์ (R) และความลาด (S) โดยที่ S คือความลาดของเส้นระดับ

พลังงาน S_f เพราะว่าการไหลในทางน้ำเปิดเป็นการไหลจากบริเวณที่มีพลังงานสูงไปสู่บริเวณที่มีพลังงานต่ำกว่า สำหรับในกรณีของการไหลแบบสม่ำเสมอ สามารถแทนค่าความลาดท้องน้ำ S_0 หรือความลาดผิวน้ำ S_w หรือความลาดของเส้นระดับพลังงาน S_f ในสมการที่ 2.35 ได้เลย เพราะ $S = S_0 = S_w = S_f$

ในช่วงปี ค.ศ.1891 ถึง ค.ศ.1895 Robert Manning วิศวกรชาวไอริชได้วิเคราะห์ผลการทดลองการไหลในทางน้ำเปิดทั้งในห้องปฏิบัติการและในแม่น้ำหลายแห่ง พบว่า ในการไหลแบบสม่ำเสมอค่าสัมประสิทธิ์ของ Chezy มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning คือ

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (36)$$

โดยที่ n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ซึ่ง Chow (1959) ได้เสนอแนะค่า n ดังตารางที่ ข.2

แทนค่า C จากสมการที่ 36 ในสมการที่ 35 จะได้

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

$$Q = VA$$

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

สมการที่ 37 และสมการที่ 38 คือ สมการการไหลแบบสม่ำเสมอของ Manning ซึ่งมีความถูกต้องเมื่อมีสภาพการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ (fully turbulent flow)

ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

ผิวทางน้ำเปิด	n
1) ทางน้ำเปิดธรรมชาติ (natural channel)	
เรียบและตรง	0.030
ไหลช้าเนื่องจากมีสระลึกเป็นช่วงๆ	0.040
แม่น้ำสายหลัก	0.035
2) ลุ่มน้ำที่มีน้ำท่วมถึง (flood plains)	
ทุ่งหญ้า	0.035
ไม้พุ่มเตี้ยบางๆ	0.050
ไม้พุ่มเตี้ยมาก	0.075
ต้นไม้	0.150
3) ทางน้ำเปิดดินขุด (excavated earth channel)	
เรียบ	0.022
มีกรวดบ้าง	0.025
เต็มไปด้วยหญ้า	0.030
ก้อนหิน	0.035
4) ทางน้ำเปิดตาดผิว (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
ยางมะตอย	0.016
โลหะลูกฟูก	0.022
หินเรียง	0.025

ที่มา: กิรติ สิวัจจนกุล, ม.ป.ป.

การเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ n ที่เหมาะสมต้องอาศัยประสบการณ์ และการตัดสินใจจากองค์ประกอบต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้

1) ความขรุขระของผิวทางน้ำเปิด (surface roughness) หมายถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุที่เป็นผิวทางน้ำเปิด ถ้าวัสดุเป็นเม็ดละเอียด จะมีค่า n ต่ำ ในขณะที่วัสดุเม็ดหยาบมีค่า n สูง

2) พืชปกคลุม (vegetation) หมายถึง การที่มีพืชเจริญเติบโตในทางน้ำเปิด เช่น มีหญ้าขึ้น หรือมีผักตบชวาลอยน้ำ เป็นต้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ค่า n มากขึ้น เพราะไปขวางทางน้ำ ทำให้ลดพื้นที่การไหล ซึ่งผลของการมีพืชปกคลุมต่อสัมประสิทธิ์ความขรุขระจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่น และชนิดของพืช

3) ความผันแปรและความคดเคี้ยวของทางน้ำเปิด (channel irregularities and alignment) คือ ความผันแปรของทางน้ำเปิดอันเนื่องมาจากความแปรเปลี่ยนของรูปร่าง หน้าตัด และขนาดตามความยาวของทางน้ำเปิด ตลอดจนความคดเคี้ยวของทางน้ำเปิด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงมาก จะทำให้สัมประสิทธิ์ความขรุขระมากตามไปด้วย

4) การกัดเซาะและการตกตะกอน (scouring and silting) เมื่อทางน้ำเปิดถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำมากก็เท่ากับเป็นการเพิ่มความขรุขระของผนังคลอง ทำให้สัมประสิทธิ์ความขรุขระมากขึ้น ในทางตรงข้าม หากมีการตกตะกอนด้วยวัสดุที่มีความละเอียดกว่าผิวทางน้ำเปิด จะช่วยลดความขรุขระของพื้นผิว ทำให้สภาพการไหลสะดวกยิ่งขึ้น ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความขรุขระจะมีแนวโน้มน้อยลง

ภาคผนวก ค

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

สมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Dissolved Oxygen Balance)

(จัตราไชย รัตนไชย, 2539)

การควบคุมปัญหามลพิษทางน้ำที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำลดต่ำลง เพื่อบรรลจุดประสงค์นี้ มาตรการป้องกันมลพิษทางน้ำส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมปริมาณสารที่ต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำเสีย ระดับความรุนแรงของสารประเภทนี้สามารถวัดออกมาในเชิงของปริมาณความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือค่า BOD การวางแผน ออกแบบ และการทำงานของอุปกรณ์บำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการเกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำ และการพยายามควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ค. 1 การสลายตัวของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ

เมื่อสารอินทรีย์ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำที่สามารถใช้ประโยชน์จากสารอินทรีย์ชนิดนั้น ก็จะใช้สารนั้นในปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เหมาะสม และนำพลังงานและสารผลผลิตที่ได้ไปใช้ในการสร้างเซลล์และกระบวนการเจริญเติบโต ผลของปฏิกิริยาจะทำให้มีการสร้างเซลล์ใหม่และการย่อยสลายซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารเคมีบางชนิดลดลง ตลอดจนการสร้างสารผลผลิตใหม่ขึ้น ซึ่งมักเรียกว่าสารผลพลอยได้ (by-product) บางชนิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ สามารถใช้เป็นสารอาหารของสิ่งมีชีวิตกลุ่มอื่นได้อีก สิ่งมีชีวิตกลุ่มหลังนี้จะสร้างปฏิกิริยาในลักษณะเดียวกับปฏิกิริยาข้างต้นและสร้างเซลล์ใหม่เพิ่มขึ้นอีก และย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือต่อไปเป็นทอด ๆ

กระบวนการเช่นนี้จะดำเนินการต่อเนื่องกันหลายขั้นตอนเพื่อตอบสนองความต้องการทางเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิตชนิดพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้มีโครงสร้างง่ายขึ้น และสร้างสารผลพลอยได้ในรูปของสารเคมีอินทรีย์และแก๊ส แล้วปล่อยสู่แหล่งน้ำ ในปฏิกิริยาเคมีแบบลูกโซ่เช่นนี้ สิ่งมีชีวิตชนิดพันธุ์ต่าง ๆ ได้ใช้สารเคมีที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเป็นอาหาร และปล่อยของเสียเพื่อเป็นอาหารแก่ชนิดพันธุ์อื่น ๆ ในห่วงโซ่อาหารอย่างต่อเนื่อง

สิ่งมีชีวิตบางชนิดในแหล่งน้ำอาจไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารเคมีบางชนิดได้ เนื่องจากไม่มีความต้องการสารดังกล่าวในกระบวนการเมตาโบลิซึมของตน ในกรณีเช่นนี้ สิ่งมีชีวิตชนิดดังกล่าวจะไม่ได้รับผลกระทบทางนิเวศจากการเติมสารเคมีชนิดนั้นๆ ลงสู่แหล่งน้ำ นอกเสียจากว่ากระบวนการถูกใช้ของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นจะสร้างสารผลพลอยได้ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมัน

ค.2 ความต้องการออกซิเจนในแหล่งน้ำ

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้แก่ ออกซิเจน กลไกที่ออกซิเจนละลายจะถูกนำไปใช้มีหลายรูปแบบ ได้แก่

ค.2.1 ความต้องการออกซิเจนแบบจับปล้น

ความต้องการออกซิเจนแบบนี้เกิดจากสารเคมีบางชนิดซึ่งมักเป็น สารเคมีอินทรีย์ (เช่น sulphites) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนในแหล่งน้ำ ความต้องการออกซิเจนแบบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเคมีที่มีคุณสมบัติในลักษณะนี้ ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นปฏิกิริยาเคมีโดยแท้ไม่ใช่ปฏิกิริยาชีวเคมีที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ความต้องการออกซิเจนในรูปแบบนี้จึงควรวัดและวิเคราะห์ต่างหาก เพราะเกิดจากกลไกที่ต่างกันและด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันมาก กล่าวคือ มักเกิดขึ้นภายในไม่กี่นาที แทนที่จะเป็นชั่วโมงหรือวันดังเช่นปฏิกิริยาชีวเคมี

ค.2.2 ความต้องการออกซิเจนแบบคาร์บอนเนเชียส (Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand; CBOD)

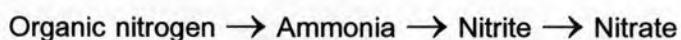
ความต้องการออกซิเจนแบบนี้เกิดจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของสารเคมีอินทรีย์โดยสิ่งมีชีวิต เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการทางชีวเคมีสิ่งที่ได้รับก็คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาเดียวกับที่เกิดขึ้นในร่างกายมนุษย์ซึ่งหายใจเอาออกซิเจนเข้าไปเพื่อใช้ในกระบวนการเมตาโบลิซึม และคายคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมา

ในความหมายทั่วไป ความต้องการออกซิเจนแบบคาร์บอนเนเชียส คือ ค่า BOD นั้นเอง การวิเคราะห์ค่า BOD ควรจะทำในลักษณะที่สามารถแยกความต้องการส่วนนี้ออกจากความต้องการออกซิเจนแบบเฉียบพลัน และความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสาเหตุต่างกัน และมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่างกัน

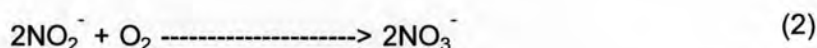
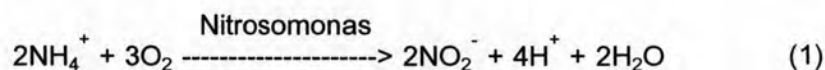
ปริมาณ BOD ในแหล่งน้ำและอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดจาก BOD ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและปริมาณของสารเคมีในน้ำ ชนิดและปริมาณของสิ่งมีชีวิต ตลอดจนสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณสารอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุปฏิกาย่อย (trace elements)

ค.2.3 ความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส (Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand; NBOD)

สารประกอบไนโตรเจนที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียอาจมีไนโตรเจนอยู่ในรูปสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้อาจเข้าทำปฏิกิริยาทางชีวเคมีเปลี่ยนรูปจากสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย และแอมโมเนียถูกเติมออกซิเจนกลายเป็นไนไตรต์และไนเตรต



ปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนหลังรวมเรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (nitrification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกันโดยแบคทีเรียไนโตรโซโมนัส (nitrosomonas) และไนโตรแบคเตอร์ (nitrobacter) ตามลำดับ



ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในกระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ ความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส หรือ NBOD ซึ่งเป็นความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาชีวเคมีเช่นเดียวกับ CBOD แต่ควรแยกพิจารณาต่างหาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดโดยจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน ใช้สารเคมีต่างกัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างกัน และด้วยอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ต่างกัน

ค.3 แบบจำลองเกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในน้ำ

สมดุลของออกซิเจนในน้ำ เป็นผลรวมของปฏิกิริยาการลดออกซิเจนในน้ำ (deoxygenation) และการเติมออกซิเจนในน้ำ (reoxygation) ปฏิกิริยาการลดออกซิเจนในน้ำ หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีต่างๆ ที่ใช้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นในน้ำ ซึ่งรวมถึงปฏิกิริยาที่เกิดจากความต้องการออกซิเจนอย่างฉับพลัน CBOD NBOD และปฏิกิริยาอื่นๆ ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้ล้วนมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ในทางตรงกันข้าม ปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนในน้ำ หมายถึง ปฏิกิริยาหรือกลไกที่เติมออกซิเจนเข้าไปในน้ำ เช่น การเติมอากาศโดยธรรมชาติ หรือปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงโดยพืชสีเขียว เป็นต้น

ค.3.1 ปฏิกิริยาการลดปริมาณออกซิเจนละลาย

ความต้องการออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาการลดออกซิเจน เกิดจากเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์หลายชนิดพันธุ์ โดยใช้สารอินทรีย์หลายชนิด ปฏิกิริยาทางชีวเคมีบางปฏิกิริยาอาจแทนได้ด้วยสมการเดียวกันหรือคล้ายๆ กัน แต่ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์หนึ่งได้ สำหรับสภาพแวดล้อมหนึ่ง ในเวลาหนึ่ง อาจไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์เดียวกันได้สำหรับอีกสภาพแวดล้อมหนึ่ง หรืออีกเวลาหนึ่ง การที่ระบบชีววิทยาตามธรรมชาติมีลักษณะซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเช่นนี้ ทำให้ในปัจจุบันเรายังไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายๆ ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ กล่าวโดยสรุปคือ แบบจำลองที่ใช้อธิบายการลดปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำสามารถใช้ได้เพียงพอประมาณค่าผลกระทบรวมๆ เกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ แต่ไม่สามารถจะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำได้

ความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ ได้ถูกเสนอขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเติม BOD ลงในลำธาร สูตรความสัมพันธ์แรกสุด ซึ่งยังคงเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ได้แก่ ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Streeter and Phelps ในปี ค.ศ. 1925 โดยทั้งสองพบว่าค่า BOD ที่วัดได้ ณ จุดต่างๆ ของลำธารเป็นฟังก์ชันของระยะทาง และสามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องพอสมควร โดยสูตรคณิตศาสตร์ง่ายๆ ดังนี้

$$-\frac{dL}{dT} = k_1 L \quad (3)$$

โดยที่ L = ปริมาณ Ultimate BOD ที่เหลือ ณ เวลา t (มิลลิกรัม/ลิตร)

t = เวลา (วัน)

k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดออกซิเจน (วัน⁻¹)

เมื่ออินทิเกรต (integrate) สมการที่ 3 ตั้งแต่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ จะได้

$$L_t = L_0 e^{-k_1 t} \quad (4)$$

โดยที่ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดออกซิเจน (วัน⁻¹)

L_t = ค่า BOD ที่เหลืออยู่ในน้ำ ณ เวลา $t=t$

L_0 = ค่า BOD ที่เหลืออยู่ในน้ำ ณ เวลา $t=0$

ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (first order reaction) ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์หลายชนิด บางครั้งก็มีเหตุผลทางทฤษฎีสนับสนุนเป็นอย่างดี เช่นในกรณีของการแผ่กัมมันตภาพรังสี และในบางกรณีก็มีหลักฐานทางสถิติสนับสนุน เช่นในกรณีของการเพิ่มประชากรและการตายของแบคทีเรียเมื่อถูกยาฆ่าเชื้อ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ BOD แต่บางครั้งก็ถูกนำไปใช้เป็นการคำนวณอย่างง่าย (empirical) กล่าวคือ ไม่มีเหตุผลทางทฤษฎีสนับสนุนอย่างชัดเจน หากเพียงเพื่อความสะดวกในการอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างโดยประมาณ

ตามสมการที่ 4 อัตราเร็วที่ BOD ถูกใช้ไป (เข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ BOD โดยที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะสูงสุด ณ บริเวณถัดจากจุดปล่อยน้ำเสีย และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณ BOD ลดลงในเวลาต่อมา นั่นคือความต้องการออกซิเจนในลำธารเนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวลดลงเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยที่อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่า k_1 เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีหลายอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่าง k_1 และอุณหภูมิยากที่จะเขียนอธิบายเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ชัดเจน เนื่องจากแต่ละปฏิกิริยามีกลไกต่างกัน อย่างไรก็ตาม อาจประมาณในภาพรวมในลักษณะความสัมพันธ์อย่างง่าย ได้ว่า

$$k_{1(T)} = k_{1(20^\circ\text{C})} \theta^{(T-20)} \quad (5)$$

โดยที่ $k_{1(T)}$ = k_1 ที่อุณหภูมิ $T^\circ\text{C}$

$k_{1(20^\circ\text{C})}$ = k_1 ที่อุณหภูมิ 20°C

θ = ค่าคงที่ = 1.047

ค.3.2 ปฏิกริยาการเติมออกซิเจนในแหล่งน้ำ

กลไกที่ออกซิเจนจะถูกเติมลงไปแหล่งน้ำมี 3 วิธี คือ (1) การเติมอากาศโดยธรรมชาติ (2) การสังเคราะห์แสงของพืช และ (3) การเติมออกซิเจนที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ

ค.3.2.1 การเติมอากาศโดยธรรมชาติ (atmospheric reaeration)

การเติมอากาศ หรือการเติมออกซิเจน หมายถึง การบวนการถ่ายเทอากาศ (gas transfer process) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติตลอดเวลาที่ผิวหน้า โมเลกุลของออกซิเจนเคลื่อนที่จากบรรยากาศเข้าสู่ น้ำตลอดเวลา ขณะเดียวกันจะมีออกซิเจนซึ่งละลายในน้ำ เคลื่อนที่ออกจากน้ำเข้าสู่บรรยากาศตลอดเวลาเช่นกัน อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนทั้งสองขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆ

ในกรณีที่ความต้องการออกซิเจนเท่ากับศูนย์ กระบวนการนี้จะเข้าสู่สภาพสมดุลทางพลวัต (dynamic equilibrium) กล่าวคือ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนไปในสองทิศทางเท่ากัน ผลที่ได้คือ ความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะถึงจุดอิ่มตัว ค่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของออกซิเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ที่สำคัญ ได้แก่ ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ

เมื่อปริมาณออกซิเจนละลายลดลงกว่าระดับที่จุดอิ่มตัว เนื่องจากความต้องการออกซิเจนในน้ำ อัตราเร็วที่โมเลกุลออกซิเจนจะเคลื่อนที่จากน้ำสู่บรรยากาศก็จะลดลง แต่อัตราเร็วที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากบรรยากาศสู่น้ำก็ยังคงเท่าเดิม เนื่องจากความดันบรรยากาศยังคงเดิม ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนจากบรรยากาศสู่น้ำจะมากกว่าจากน้ำสู่บรรยากาศ ผลลัพธ์สุทธิคือ การเติมออกซิเจนลงไปน้ำเพื่อทดแทนส่วนที่หายไป กระบวนการเติมอากาศโดยวิธีธรรมชาตินี้ อาจอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_0 - C) \quad (6)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ

C_0 = ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำ

t = เวลา

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอากาศ

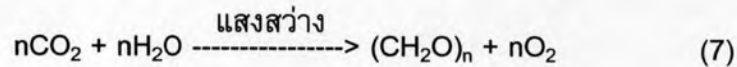
A = พื้นที่ผิวสัมผัส

V = ปริมาณน้ำ (หรือของเหลวอื่น)

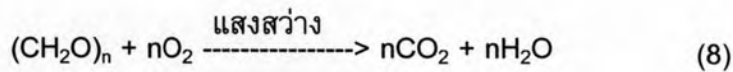
ค่าสัมประสิทธิ์ k_L ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ
ฟิล์มที่เกิดบนผิวน้ำ ความปั่นป่วนของกระแส (turbulence) และสารเจือปนในน้ำ

ค.3.2.2 การสังเคราะห์แสง (photosynthesis)

การสังเคราะห์แสงโดยคลอโรฟิลล์ของพืชสีเขียวในน้ำ
โดยเฉพาะสาหร่ายเป็นอีกกลไกหนึ่งที่ทำให้เกิดการเติมออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ ตามสมการ

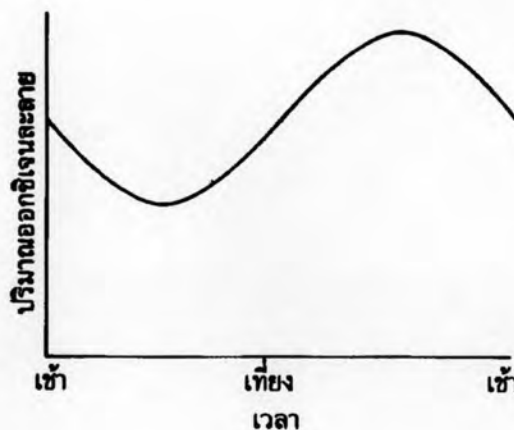


$(\text{CH}_2\text{O})_n$ หมายถึง เซลล์ใหม่ของสาหร่ายที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยา ขณะเดียวกันสาหร่ายก็ใช้ออกซิเจนในการหายใจ



โดยทั่วไป ปริมาณออกซิเจนที่สร้างขึ้นจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของที่ถูกใช้ไปในการหายใจ แต่เมื่อสาหร่ายตาย การย่อยสลายของสาหร่ายต้องการออกซิเจนจากแหล่งน้ำ ซึ่งอาจสร้างผลกระทบทางลบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำมากเช่นกัน

ด้วยเหตุที่การสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงกลางวันที่มีแสงสว่างแต่การหายใจเกิดขึ้นตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณออกซิเจนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในแต่ละวัน (diurnal variation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทะเลสาบ ภาพที่ ค.1 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



ภาพที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในแต่ละวัน

ปริมาณออกซิเจนจะลดลงต่ำสุดตอนเช้าตรู่ ในช่วงกลางวัน ปฏิริยาสังเคราะห์แสงจะเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แหล่งน้ำจนถึงจุดสูงสุดในตอนบ่าย หลังจากนั้น เมื่อแสงอาทิตย์ลดน้อยลง ปฏิริยาสังเคราะห์แสงจะช้าลง การเติมออกซิเจนก็ลดลง จนในที่สุดเหลือแต่การใช้ออกซิเจนในการหายใจ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดต่ำสุดในตอนเช้าตรู่ก่อนเริ่มต้นของวัฏจักรใหม่ในวันต่อไป การเข้าใจปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนควบคุมการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ได้มีการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากมายสำหรับอธิบายกระบวนการเติมออกซิเจนโดยการสังเคราะห์แสง แต่ก็ยังไม่มีแบบจำลองใดเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย

ค.3.2.3 การเติมออกซิเจนที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ (artificial oxygenation)

นอกจากกลไกทั้งสองข้างต้น ในทางปฏิบัติบางครั้งต้องหาวิธีการต่างๆ เพื่อเติมอากาศลงไปใต้น้ำ เพื่อรักษาสมดุลออกซิเจนให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เช่น

- 1) การเติมอากาศโดยแรงกล
- 2) การเติมอากาศโดยกังหัน (turbine)
- 3) การเติมอากาศโดยฝาย

ค.3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเติมอากาศ

แบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติสำหรับอธิบายกระบวนการเติมอากาศในลำธาร ใช้หลักการของสมการถ่ายเทอากาศ (สมการที่ 2.45) เนื่องจากความเข้าใจในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์แสงยังไม่ดีพอ จึงมักไม่ได้นำไว้ในแบบจำลอง ส่วนการเติมอากาศที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งใช้เพียงบางกรณีก็มักจะไม่ได้นำไว้ในสมการทั่วไปเช่นกัน แต่จะพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป

ในสมการที่ 6 เทอม $C_0 - C$ คือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นสูงสุดของปริมาณออกซิเจนละลาย (C_0) กับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายขณะนั้น (C) ซึ่งมักจะเรียกว่า ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ (deficit: D)

$$D = C_0 - C \quad (9)$$

ในส่วน of ลำธารใดๆ ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าพื้นที่ (A) ปริมาตร (V) และความเข้มข้นสูงสุด (C_0) มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C) มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ ดังนั้นสมการที่ 2.45 อาจเขียนเป็น

$$\frac{dD}{dt} = k_2 D \quad (10)$$

ซึ่งเมื่ออินทิเกรตจะได้

$$D = D_0 e^{k_2 t} \quad (11)$$

โดยที่ D = ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ ($C_0 - C$) เมื่อเวลา t

D_0 = ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดเมื่อเวลา $t = 0$

k_2 = สัมประสิทธิ์ของการเติมอากาศ

กระบวนการเติมอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าของ k_2 และ C_0 (และ D) เปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่าง k_2 กับอุณหภูมิอาจแสดงได้โดยความสัมพันธ์

$$k_{2,t} = k_{2,20^\circ\text{C}} \alpha^{(T-20)} \quad (12)$$

โดยที่ $k_{2,t}$ = สัมประสิทธิ์การเติมอากาศที่ $T^\circ\text{C}$

$k_{2,20^\circ\text{C}}$ = สัมประสิทธิ์การเติมอากาศที่ 20°C

α = ค่าคงที่ = 1.0238

ค.4 สมการของ Streeter – Phelps

เมื่อรวมสมการของกระบวนการเติมออกซิเจนและลดออกซิเจนเข้าด้วยกันจะได้สมการรวมสำหรับอธิบายสมดุลของออกซิเจน สมการหนึ่งที่น่าจะนิยมนำมาใช้กันมาก คือ สมการของ Streeter – Phelps ซึ่งตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์สองท่านผู้บุกเบิกงานด้านนี้

หลักการของเรื่องนี้เป็นเรื่องที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย โดยอาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[\text{ความเข้มข้นของออกซิเจนท้ายน้ำ}] = [\text{ความเข้มข้นของออกซิเจนต้นน้ำ}] + [\text{การเติมออกซิเจน}] - [\text{การลดออกซิเจน}]$$

ตั้งได้กล่าวข้างต้นแล้ว เกี่ยวกับกระบวนการเติมออกซิเจน และกระบวนการลดออกซิเจน ดังนั้น เมื่อรวมสมการของการเติมออกซิเจน (สมการที่ 10) เข้ากับสมการของการลดออกซิเจน (สมการที่ 3) จะได้ผลรวมของการลดและเพิ่มออกซิเจน

$$\frac{dD}{dt} = k_1L - k_2D \quad (13)$$

แทนค่า L ด้วย $L_0e^{-k_1t}$ และค่า D ด้วย $D_0e^{-k_2t}$ แล้วอินทิเกรต จะได้

$$D = \frac{k_1L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1t} - e^{-k_2t}) + D_0e^{-k_2t} \quad (14)$$

สมการที่ 14 คือ สมการ Streeter - Phelps ซึ่งจะให้ค่าปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ (D) ที่จุดต่างๆ ตรงบริเวณท้ายน้ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

- 1) ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ในตอนเริ่มต้น (D_0)
- 2) ปริมาณ BOD ตอนเริ่มต้น (L_0)
- 3) สัมประสิทธิ์ของการลดออกซิเจน (k_1)
- 4) สัมประสิทธิ์ของการเติมออกซิเจน (k_2)
- 5) เวลาที่น้ำไหล (t) ในลำธารตั้งแต่จุดเริ่มต้น

คำตอบของสมการ Streeter - Phelps ที่ค่า t ต่างๆ จะให้กราฟออกซิเจนแซก (oxygen sag curve) ดังแสดงในรูป ค.2



ภาพที่ ค.2 กราฟออกซิเจนแซก

เริ่มที่การเติม BOD ลงในจุดบริเวณต้นน้ำ ปริมาณออกซิเจนจะลดลงอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะถูกเติมได้ทันโดยวิธีธรรมชาติ ในเวลาต่อมา เมื่อ BOD ลดลง อัตราการลดออกซิเจนจะลดลง ขณะที่อัตราการเติมออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลงจนถึงจุดวิกฤต ซึ่งอัตราเร็วทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงจนถึงจุดต่ำสุด และออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จุดวิกฤตเป็นจุดสำคัญมาก เนื่องจากเป็นจุดที่มีระดับออกซิเจนละลายต่ำสุด เป็นบริเวณที่อาจมีปัญหา ซึ่งต้องได้รับการตรวจติดตามเป็นพิเศษ

เมื่อมีจุดปล่อยน้ำเสียหลายๆ จุด อาจใช้สมการ Streeter - Phelps สำหรับหาค่าออกซิเจนที่จุดต่างๆ ในลำธารได้ ในทางกลับกัน เราอาจใช้สมการนี้เพื่อกำหนดค่า BOD ที่สามารถปล่อยสู่ลำธารได้ โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนให้อยู่ในระดับหนึ่ง วิธีการเช่นนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไปในการกำหนดปริมาณน้ำทิ้ง การแก้สมการดังกล่าวจะยุ่งยากขึ้นเมื่อมีหลายสมการ (จุดน้ำทิ้งหลายจุด)

สมการของ Streeter - Phelps เป็นสมการหลักที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการทำนายผลกระทบของน้ำเสียต่อปริมาณออกซิเจนในลำธาร อย่างไรก็ตามสมการนี้ยังมีขีดจำกัดอยู่บ้าง ได้แก่

- 1) จากข้อสมมติฐานเบื้องต้นที่ว่า กระบวนการเติมและลดออกซิเจนในน้ำเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจมิได้เป็นเช่นนั้น เมื่อใดที่ปฏิกิริยาในแหล่งน้ำนั้นมีพฤติกรรมต่างจากสมมติฐานมาก แบบจำลองนี้อาจให้คำตอบที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้
- 2) แบบจำลองนี้ไม่ได้รวมถึงผลของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และกระบวนการสังเคราะห์แสง ต่อปริมาณออกซิเจนในน้ำ ได้มีการทดลองเพิ่มสมการเหล่านี้เข้าไปในแบบจำลองบ้างในระยะต่อมาแต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ
- 3) สมการนี้ใช้ประยุกต์ได้ดีสำหรับลำธารส่วนที่เป็นน้ำจืดเท่านั้น พบว่าคำตอบที่ได้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้ที่บริเวณปากแม่น้ำบริเวณติดทะเล หรือทะเลสาบยังมีปัญหาอยู่บ้าง
- 4) การที่ไม่มีแบบจำลองอื่นให้เลือก หรือการมีแบบจำลองเดียวสำหรับกรณีทั่วไปทุกกรณีทำให้บางครั้งแบบจำลองถูกใช้ไปในกรณีที่ไม่เหมาะสมกับสถานการณ์

ภาคผนวก ค

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

สมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Dissolved Oxygen Balance)

(ฉัตรไชย รัตนไชย, 2539)

การควบคุมปัญหามลพิษทางน้ำที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำลดต่ำลง เพื่อบรรลุจุดประสงค์นี้ มาตรการป้องกันมลพิษทางน้ำส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมปริมาณสารที่ต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำเสีย ระดับความรุนแรงของสารประเภทนี้สามารถวัดออกมาในเชิงของปริมาณความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือค่า BOD การวางแผนออกแบบ และการทำงานของอุปกรณ์บำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการเกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำ และการพยายามควบคุมปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ค. 1 การสลายตัวของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ

เมื่อสารอินทรีย์ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำที่สามารถใช้ประโยชน์จากสารอินทรีย์ชนิดนั้น ก็จะใช้สารนั้นในปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เหมาะสม และนำพลังงานและสารผลผลิตที่ได้ไปใช้ในการสร้างเซลล์และกระบวนการเจริญเติบโต ผลของปฏิกิริยาจะทำให้มีการสร้างเซลล์ใหม่และการย่อยสลายซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารเคมีบางชนิดลดลง ตลอดจนการสร้างสารผลผลิตใหม่ขึ้น ซึ่งมักเรียกว่าสารผลพลอยได้ (by-product) บางชนิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างง่าย ๆ สามารถใช้เป็นสารอาหารของสิ่งมีชีวิตกลุ่มอื่นได้อีก สิ่งมีชีวิตกลุ่มหลังนี้จะสร้างปฏิกิริยาในลักษณะเดียวกับปฏิกิริยาข้างต้นและสร้างเซลล์ใหม่เพิ่มขึ้นอีก และย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือต่อไปเป็นทอด ๆ

กระบวนการเช่นนี้จะดำเนินการต่อเนื่องกันหลายขั้นตอนเพื่อตอบสนองความต้องการทางเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิตชนิดพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้มีโครงสร้างง่ายขึ้น และสร้างสารผลพลอยได้ในรูปของสารเคมีอินทรีย์และแก๊ส แล้วปล่อยสู่แหล่งน้ำ ในปฏิกิริยาเคมีแบบลูกโซ่เช่นนี้ สิ่งมีชีวิตชนิดพันธุ์ต่าง ๆ ได้ใช้สารเคมีที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเป็นอาหาร และปล่อยของเสียเพื่อเป็นอาหารแก่ชนิดพันธุ์อื่น ๆ ในห่วงโซ่อาหารอย่างต่อเนื่อง

สิ่งมีชีวิตบางชนิดในแหล่งน้ำอาจไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารเคมีบางชนิดได้ เนื่องจากไม่มีความต้องการสารดังกล่าวในกระบวนการเมตาโบลิซึมของตน ในกรณีเช่นนี้ สิ่งมีชีวิตชนิดดังกล่าวจะไม่ได้รับผลกระทบทางนิเวศจากการเติมสารเคมีชนิดนั้นๆ ลงสู่แหล่งน้ำ นอกเสียจากว่ากระบวนการถูกโคของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นจะสร้างสารผลพลอยได้ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมัน

ค.2 ความต้องการออกซิเจนในแหล่งน้ำ

ปัจจัยหนึ่งที่เป็นจำเป็นในกระบวนการเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้แก่ ออกซิเจน กลไกที่ออกซิเจนละลายจะถูกนำไปใช้มีหลายรูปแบบ ได้แก่

ค.2.1 ความต้องการออกซิเจนแบบจับปล้น

ความต้องการออกซิเจนแบบนี้เกิดจากสารเคมีบางชนิดซึ่งมักเป็น สารเคมีอินทรีย์ (เช่น sulphites) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนในแหล่งน้ำ ความต้องการออกซิเจนแบบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเคมีที่มีคุณสมบัติในลักษณะนี้ ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นปฏิกิริยาเคมีโดยแท้ไม่ใช่ปฏิกิริยาชีวเคมีที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ความต้องการออกซิเจนในรูปแบบนี้จึงควรวัดและวิเคราะห์ต่างหาก เพราะเกิดจากกลไกที่ต่างกันและด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันมาก กล่าวคือ มักเกิดขึ้นภายในไม่กี่นาที แทนที่จะเป็นชั่วโมงหรือวันดังเช่นปฏิกิริยาชีวเคมี

ค.2.2 ความต้องการออกซิเจนแบบคาร์บอนเนเชียส (Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand; CBOD)

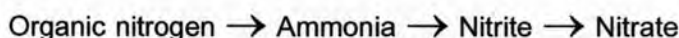
ความต้องการออกซิเจนแบบนี้เกิดจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของสารเคมีอินทรีย์โดยสิ่งมีชีวิต เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการทางชีวเคมีสิ่งที่ได้รับก็คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาเดียวกับที่เกิดขึ้นในร่างกายมนุษย์ซึ่งหายใจเอาออกซิเจนเข้าไปเพื่อใช้ในกระบวนการเมตาโบลิซึม และคายคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมา

ในความหมายทั่วไป ความต้องการออกซิเจนแบบคาร์บอนเนเชียส คือ ค่า BOD นั้นเอง การวิเคราะห์ค่า BOD ควรจะทำในลักษณะที่สามารถแยกความต้องการส่วนนี้ออกจากความต้องการออกซิเจนแบบเฉียบพลัน และความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสาเหตุต่างกัน และมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่างกัน

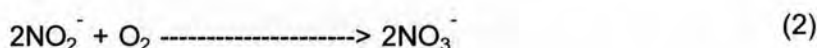
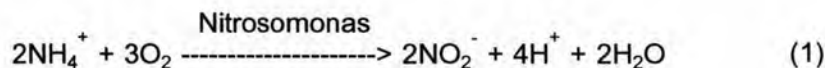
ปริมาณ BOD ในแหล่งน้ำและอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดจาก BOD ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและปริมาณของสารเคมีในน้ำ ชนิดและปริมาณของสิ่งมีชีวิต ตลอดจนสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณสารอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุปฏิกิริยา (trace elements)

ค.2.3 ความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส (Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand; NBOD)

สารประกอบไนโตรเจนที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียอาจมีไนโตรเจนอยู่ในรูปสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้อาจเข้าทำปฏิกิริยาทางชีวเคมีเปลี่ยนรูปจากสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย และแอมโมเนียถูกเติมออกซิเจนกลายเป็นไนไตรต์และไนเตรต



ปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนหลังรวมเรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (nitrification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกันโดยแบคทีเรียไนโตรโซโมนัส (nitrosomonas) และไนโตรแบคเตอร์ (nitrobacter) ตามลำดับ



ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในกระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ ความต้องการออกซิเจนแบบไนโตรจีนัส หรือ NBOD ซึ่งเป็นความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาชีวเคมีเช่นเดียวกับ CBOD แต่ควรแยกพิจารณาต่างหาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดโดยจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน ใช้สารเคมีต่างกัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างกัน และด้วยอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ต่างกัน



ค.3 แบบจำลองเกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในน้ำ

สมดุลของออกซิเจนในน้ำ เป็นผลรวมของปฏิกิริยาการลดออกซิเจนในน้ำ (deoxygenation) และการเติมออกซิเจนในน้ำ (reoxygation) ปฏิกิริยาการลดออกซิเจนในน้ำ หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีต่างๆ ที่ใช้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นในน้ำ ซึ่งรวมถึงปฏิกิริยาที่เกิดจากความต้องการออกซิเจนอย่างฉับพลัน CBOD NBOD และปฏิกิริยาอื่นๆ ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้ล้วนมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ในทางตรงกันข้าม ปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนในน้ำ หมายถึง ปฏิกิริยาหรือกลไกที่เติมออกซิเจนเข้าไปในน้ำ เช่น การเติมอากาศโดยธรรมชาติ หรือปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงโดยพืชสีเขียว เป็นต้น

ค.3.1 ปฏิกิริยาการลดปริมาณออกซิเจนละลาย

ความต้องการออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาการลดออกซิเจน เกิดจากเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์หลายชนิดพันธุ์ โดยใช้สารอินทรีย์หลายชนิด ปฏิกิริยาทางชีวเคมีบางปฏิกิริยาอาจแทนได้ด้วยสมการเดียวกันหรือคล้ายๆ กัน แต่ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์หนึ่งได้ สำหรับสภาพแวดล้อมหนึ่ง ในเวลาหนึ่ง อาจไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์เดียวกันได้สำหรับอีกสภาพแวดล้อมหนึ่ง หรืออีกเวลาหนึ่ง การที่ระบบชีววิทยาตามธรรมชาติมีลักษณะซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเช่นนี้ ทำให้ในปัจจุบันเรายังไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายๆ ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ กล่าวโดยสรุปคือ แบบจำลองที่ใช้อธิบายการลดปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำสามารถใช้ได้เพียงเพื่อประมาณค่าผลกระทบรวมๆ เกี่ยวกับสมดุลของออกซิเจนในแหล่งน้ำ แต่ไม่สามารถจะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำได้

ความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ ได้ถูกเสนอขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเติม BOD ลงในลำธาร สูตรความสัมพันธ์แรกสุด ซึ่งยังคงเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ได้แก่ ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Streeter and Phelps ในปี ค.ศ. 1925 โดยทั้งสองพบว่าค่า BOD ที่วัดได้ ณ จุดต่างๆ ของลำธารเป็นฟังก์ชันของระยะทาง และสามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องพอสมควร โดยสูตรคณิตศาสตร์ง่ายๆ ดังนี้

$$-\frac{dL}{dt} = k_1 L \quad (3)$$

โดยที่ L = ปริมาณ Ultimate BOD ที่เหลือ ณ เวลา t (มิลลิกรัม/ลิตร)

t = เวลา (วัน)

k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดออกซิเจน (วัน⁻¹)

เมื่ออินทิเกรต (integrate) สมการที่ 3 ตั้งแต่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ จะได้

$$L_t = L_0 e^{-k_1 t} \quad (4)$$

โดยที่ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดออกซิเจน (วัน⁻¹)

L_t = ค่า BOD ที่เหลืออยู่ในน้ำ ณ เวลา $t=t$

L_0 = ค่า BOD ที่เหลืออยู่ในน้ำ ณ เวลา $t=0$

ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (first order reaction) ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์หลายชนิด บางครั้งก็มีเหตุผลทางทฤษฎีสนับสนุนเป็นอย่างดี เช่นในกรณีของการแผ่กัมมันตภาพรังสี และในบางกรณีก็มีหลักฐานทางสถิติสนับสนุน เช่นในกรณีของการเพิ่มประชากรและการตายของแบคทีเรียเมื่อถูกยาฆ่าเชื้อ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ BOD แต่บางครั้งก็ถูกนำไปใช้เป็นการคำนวณอย่างง่าย (empirical) กล่าวคือ ไม่มีเหตุผลทางทฤษฎีสนับสนุนอย่างชัดเจน หากเพียงเพื่อความสะดวกในการอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างโดยประมาณ

ตามสมการที่ 4 อัตราเร็วที่ BOD ถูกใช้ไป (เข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ BOD โดยที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะสูงสุด ณ บริเวณถัดจากจุดปล่อยน้ำเสีย และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณ BOD ลดลงในเวลาต่อมา นั่นคือความต้องการออกซิเจนในลำธารเนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวลดลงเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยที่อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่า k_1 เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีหลายอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่าง k_1 และอุณหภูมิยากที่จะเขียนอธิบายเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ชัดเจน เนื่องจากแต่ละปฏิกิริยามีกลไกต่างกัน อย่างไรก็ตาม อาจประมาณในภาพรวมในลักษณะความสัมพันธ์อย่างง่าย ได้ว่า

$$k_{1(T)} = k_{1(20^\circ\text{C})} \theta^{(T-20)} \quad (5)$$

โดยที่ $k_{1(T)}$ = k_1 ที่อุณหภูมิ $T^\circ\text{C}$

$k_{1(20^\circ\text{C})}$ = k_1 ที่อุณหภูมิ 20°C

θ = ค่าคงที่ = 1.047

ค.3.2 ปฏิกริยาการเติมออกซิเจนในแหล่งน้ำ

กลไกที่ออกซิเจนจะถูกเติมลงไปแหล่งน้ำมี 3 วิธี คือ (1) การเติมอากาศโดยธรรมชาติ (2) การสังเคราะห์แสงของพืช และ (3) การเติมออกซิเจนที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ

ค.3.2.1 การเติมอากาศโดยธรรมชาติ (atmospheric reaeration)

การเติมอากาศ หรือการเติมออกซิเจน หมายถึง การบวนการถ่ายเทอากาศ (gas transfer process) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติตลอดเวลาที่ผิวน้ำ โมเลกุลของออกซิเจนเคลื่อนที่จากบรรยากาศเข้าสู่ น้ำตลอดเวลา ขณะเดียวกันจะมีออกซิเจนซึ่งละลายในน้ำ เคลื่อนที่ออกจากน้ำเข้าสู่บรรยากาศตลอดเวลาเช่นกัน อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนทั้งสองขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและตัวแปรอื่นๆ

ในกรณีที่ความต้องการออกซิเจนเท่ากับศูนย์ กระบวนการนี้จะเข้าสู่สภาพสมดุลทางพลวัต (dynamic equilibrium) กล่าวคือ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนไปในสองทิศทางเท่ากัน ผลที่ได้คือ ความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะถึงจุดอิ่มตัว ค่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของออกซิเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ที่สำคัญ ได้แก่ ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ

เมื่อปริมาณออกซิเจนละลายลดลงกว่าระดับที่จุดอิ่มตัว เนื่องจากความต้องการออกซิเจนในน้ำ อัตราเร็วที่โมเลกุลออกซิเจนจะเคลื่อนที่จากน้ำสู่บรรยากาศก็จะลดลง แต่อัตราเร็วที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากบรรยากาศสู่น้ำก็ยังคงเท่าเดิม เนื่องจากความดันบรรยากาศยังคงเดิม ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกซิเจนจากบรรยากาศสู่น้ำจะมากกว่าจากน้ำสู่บรรยากาศ ผลลัพธ์สุทธิคือ การเติมออกซิเจนลงไปน้ำเพื่อทดแทนส่วนที่หายไป กระบวนการเติมอากาศโดยวิธีธรรมชาตินี้ อาจอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_0 - C) \quad (6)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ

C_0 = ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำ

t = เวลา

k_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอากาศ

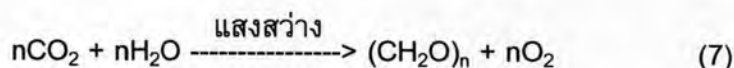
A = พื้นที่ผิวสัมผัส

V = ปริมาณน้ำ (หรือของเหลวอื่น)

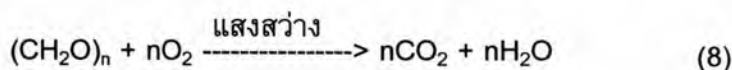
ค่าสัมประสิทธิ์ k_L ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ
ฟิล์มที่เกิดบนผิวน้ำ ความปั่นป่วนของกระแสน้ำ (turbulence) และสารเจือปนในน้ำ

ค.3.2.2 การสังเคราะห์แสง (photosynthesis)

การสังเคราะห์แสงโดยคลอโรฟิลล์ของพืชสีเขียวในน้ำ
โดยเฉพาะสาหร่ายเป็นอีกกลไกหนึ่งที่ทำให้เกิดการเติมออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ ตามสมการ

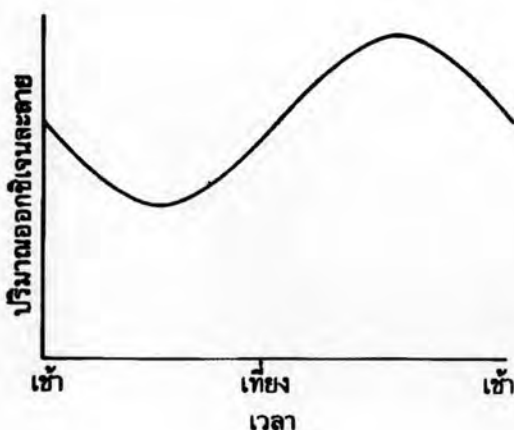


$(\text{CH}_2\text{O})_n$ หมายถึง เซลล์ใหม่ของสาหร่ายที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยา ขณะเดียวกันสาหร่ายก็ใช้ออกซิเจนในการหายใจ



โดยทั่วไป ปริมาณออกซิเจนที่สร้างขึ้นจะมีค่าประมาณ 1.5
เท่าของที่ถูกใช้ไปในการหายใจ แต่เมื่อสาหร่ายตาย การย่อยสลายของสาหร่ายต้องการ
ออกซิเจนจากแหล่งน้ำ ซึ่งอาจสร้างผลกระทบทางลบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำมากเช่นกัน

ด้วยเหตุที่การสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงกลางวัน
มีแสงสว่างแต่การหายใจเกิดขึ้นตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณออกซิเจนเปลี่ยนแปลง
ตลอดเวลาในแต่ละวัน (diurnal variation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทะเลสาบ ภาพที่ ค.1 แสดง
ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



ภาพที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในแต่ละวัน

ปริมาณออกซิเจนจะลดลงต่ำสุดตอนเช้าตรู่ ในช่วงกลางวัน ปฏิริยาสังเคราะห์แสงจะเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แหล่งน้ำจนถึงจุดสูงสุดในตอนบ่าย หลังจากนั้น เมื่อแสงอาทิตย์ลดน้อยลง ปฏิริยาสังเคราะห์แสงจะช้าลง การเติมออกซิเจนก็ลดลง จนในที่สุดเหลือแต่การใช้ออกซิเจนในการหายใจ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดต่ำสุดในตอนเช้าตรู่ก่อนเริ่มต้นของวัฏจักรใหม่ในวันต่อไป การเข้าใจปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนควบคุมการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ได้มีการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากมายสำหรับอธิบายกระบวนการเติมออกซิเจนโดยการสังเคราะห์แสง แต่ก็ยังไม่มีแบบจำลองใดเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย

ค.3.2.3 การเติมออกซิเจนที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ (artificial oxygenation)

นอกจากกลไกทั้งสองข้างต้น ในทางปฏิบัติบางครั้งต้องหาวิธีการต่างๆ เพื่อเติมอากาศลงไปใต้น้ำ เพื่อรักษาสมดุลออกซิเจนให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เช่น

- 1) การเติมอากาศโดยแรงกล
- 2) การเติมอากาศโดยกังหัน (turbine)
- 3) การเติมอากาศโดยฝาย

ค.3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเติมอากาศ

แบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติสำหรับอธิบายกระบวนการเติมอากาศในลำธาร ใช้หลักการของสมการถ่ายเทอากาศ (สมการที่ 2.45) เนื่องจากความเข้าใจในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์แสงยังไม่ดีพอ จึงมักไม่ได้รวมไว้ในแบบจำลอง ส่วนการเติมอากาศที่ไม่ใช่โดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งใช้เพียงบางกรณีก็มักจะไม่ได้นำไว้ในสมการทั่วไปเช่นกัน แต่จะพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป

ในสมการที่ 6 เทอม $C_0 - C$ คือความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นสูงสุดของปริมาณออกซิเจนละลาย (C_0) กับความเข้มข้นของออกซิเจนละลายขณะนั้น (C) ซึ่งมักจะเรียกว่า ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ (deficit: D)

$$D = C_0 - C \quad (9)$$

ในส่วนของลำธารใดๆ ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าพื้นที่ (A) ปริมาตร (V) และความเข้มข้นสูงสุด (C_0) มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C) มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ ดังนั้นสมการที่ 2.45 อาจเขียนเป็น

$$\frac{dD}{dt} = k_2 D \quad (10)$$

ซึ่งเมื่ออินทิเกรตจะได้

$$D = D_0 e^{k_2 t} \quad (11)$$

โดยที่ D = ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ ($C_0 - C$) เมื่อเวลา t

D_0 = ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดเมื่อเวลา $t = 0$

k_2 = สัมประสิทธิ์ของการเติมอากาศ

กระบวนการเติมอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิทำให้ค่าของ k_2 และ C_0 (และ D) เปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่าง k_2 กับอุณหภูมิอาจแสดงได้โดยความสัมพันธ์

$$k_{2,t} = k_{2,20^\circ\text{C}} \alpha^{(T-20)} \quad (12)$$

โดยที่ $k_{2,t}$ = สัมประสิทธิ์การเติมอากาศที่ $T^\circ\text{C}$

$k_{2,20^\circ\text{C}}$ = สัมประสิทธิ์การเติมอากาศที่ 20°C

α = ค่าคงที่ = 1.0238

ค.4 สมการของ Streeter – Phelps

เมื่อรวมสมการของกระบวนการเติมออกซิเจนและลดออกซิเจนเข้าด้วยกันจะได้สมการรวมสำหรับอธิบายสมดุลของออกซิเจน สมการหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก คือ สมการของ Streeter – Phelps ซึ่งตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์สองท่านผู้บุกเบิกงานด้านนี้

หลักการของเรื่องนี้เป็นเรื่องที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย โดยอาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned} [\text{ความเข้มข้นของออกซิเจนท้ายน้ำ}] &= [\text{ความเข้มข้นของออกซิเจนต้นน้ำ}] + [\text{การเติมออกซิเจน}] \\ &\quad - [\text{การลดออกซิเจน}] \end{aligned}$$

ตั้งได้กล่าวข้างต้นแล้ว เกี่ยวกับกระบวนการเติมออกซิเจน และกระบวนการลดออกซิเจน ดังนั้น เมื่อรวมสมการของการเติมออกซิเจน (สมการที่ 10) เข้ากับสมการของการลดออกซิเจน (สมการที่ 3) จะได้ผลรวมของการลดและเพิ่มออกซิเจน

$$\frac{dD}{dt} = k_1L - k_2D \quad (13)$$

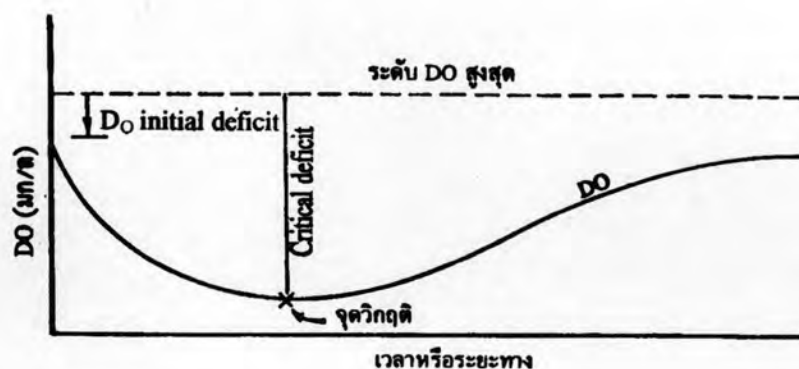
แทนค่า L ด้วย $L_0e^{-k_1t}$ และค่า D ด้วย $D_0e^{-k_2t}$ แล้วอินทิเกรต จะได้

$$D = \frac{k_1L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1t} - e^{-k_2t}) + D_0e^{-k_2t} \quad (14)$$

สมการที่ 14 คือ สมการ Streeter - Phelps ซึ่งจะให้ค่าปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ (D) ที่จุดต่างๆ ตรงบริเวณท้ายน้ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

- 1) ปริมาณออกซิเจนที่ยังขาดอยู่ในตอนเริ่มต้น (D_0)
- 2) ปริมาณ BOD ตอนเริ่มต้น (L_0)
- 3) สัมประสิทธิ์ของการลดออกซิเจน (k_1)
- 4) สัมประสิทธิ์ของการเติมออกซิเจน (k_2)
- 5) เวลาที่น้ำไหล (t) ในลำธารตั้งแต่จุดเริ่มต้น

คำตอบของสมการ Streeter - Phelps ที่ค่า t ต่างๆ จะให้กราฟออกซิเจนแซก (oxygen sag curve) ดังแสดงในรูป ค.2



ภาพที่ ค.2 กราฟออกซิเจนแซก

เริ่มที่การเติม BOD ลงในจุดบริเวณต้นน้ำ ปริมาณออกซิเจนจะลดลงอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะถูกเติมได้ทันโดยวิธีธรรมชาติ ในเวลาต่อมา เมื่อ BOD ลดลง อัตราการลดออกซิเจนจะลดลง ขณะที่อัตราการเติมออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลงจนถึงจุดวิกฤต ซึ่งอัตราเร็วทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงจนถึงจุดต่ำสุด และออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จุดวิกฤตเป็นจุดสำคัญมาก เนื่องจากเป็นจุดที่มีระดับออกซิเจนละลายต่ำสุด เป็นบริเวณที่อาจมีปัญหา ซึ่งต้องได้รับการตรวจติดตามเป็นพิเศษ

เมื่อมีจุดปล่อยน้ำเสียหลายๆ จุด อาจใช้สมการ Streeter – Phelps สำหรับหาค่าออกซิเจนที่จุดต่างๆ ในลำธารได้ ในทางกลับกัน เราอาจใช้สมการนี้เพื่อกำหนดค่า BOD ที่สามารถปล่อยสู่ลำธารได้ โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนให้อยู่ในระดับหนึ่ง วิธีการเช่นนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไปในการกำหนดปริมาณน้ำทิ้ง การแก้สมการดังกล่าวจะยุ่งยากขึ้นเมื่อมีหลายสมการ (จุดน้ำทิ้งหลายจุด)

สมการของ Streeter – Phelps เป็นสมการหลักที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับการทำนายผลกระทบของน้ำเสียต่อปริมาณออกซิเจนในลำธาร อย่างไรก็ตามสมการนี้ยังมีขีดจำกัดอยู่บ้าง ได้แก่

1) จากข้อสมมติฐานเบื้องต้นที่ว่า กระบวนการเติมและลดออกซิเจนในน้ำเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจมิได้เป็นเช่นนั้น เมื่อใดที่ปฏิกิริยาในแหล่งน้ำนั้นมีพฤติกรรมต่างจากสมมติฐานมาก แบบจำลองนี้อาจให้คำตอบที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้

2) แบบจำลองนี้ไม่ได้รวมถึงผลของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และกระบวนการสังเคราะห์แสง ต่อปริมาณออกซิเจนในน้ำ ได้มีการทดลองเพิ่มสมการเหล่านี้เข้าไปในแบบจำลองบ้างในระยะต่อมาแต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ

3) สมการนี้ใช้ประยุกต์ได้ดีสำหรับลำธารส่วนที่เป็นน้ำจืดเท่านั้น พบว่าคำตอบที่ได้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้ที่บริเวณปากแม่น้ำบริเวณติดทะเล หรือทะเลสาบยังมีปัญหาอยู่บ้าง

4) การที่ไม่มีแบบจำลองอื่นให้เลือก หรือการมีแบบจำลองเดียวสำหรับกรณีทั่วไปทุกกรณีทำให้บางครั้งแบบจำลองถูกใช้ไปในกรณีที่ไม่เหมาะสมกับสถานการณ์

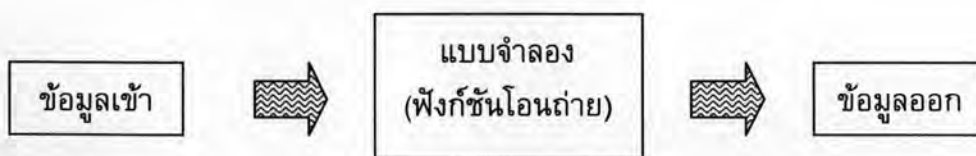
ภาคผนวก

กระบวนการและขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกิดจากความพยายามของมนุษย์ที่จะจำลองสภาพ (simulate) ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นไม่ว่าสิ่งนั้นจะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือเป็นสิ่งที่มนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องด้วย โดยพยายามอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถช่วยให้เข้าใจระบบได้ดีขึ้น แบบจำลองที่ดีนั้นสามารถใช้คาดการณ์ถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบย่อยๆ ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยคาดการณ์ว่าจะอะไรจะเกิดขึ้นเมื่อภาวะการณ์ภายนอกระบบแปรผันไปจากเดิม หรือช่วยให้ทราบว่าอะไรเป็นปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดกระบวนการหรือพฤติกรรมต่างๆ (ทวิวงศ์ ศรีบุรี, 2541) โดยสรุปแล้ววัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองมี 5 ประการ คือ

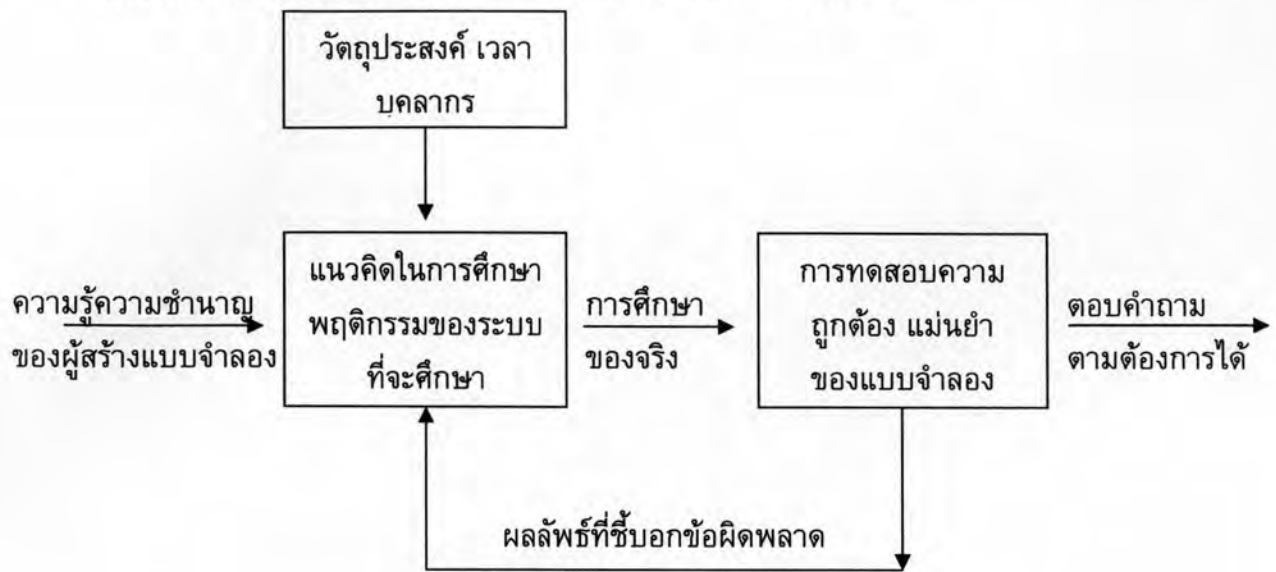
- 1) เพื่อบอกถึงข้อเท็จจริงเกี่ยวกับระบบ
- 2) เพื่อบอกถึงแนวความคิดของผู้สร้างแบบจำลองที่มีต่อระบบและการจัดการระบบ
- 3) เพื่อทำให้ผู้สร้างและผู้อื่นในวงการวิเคราะห์ระบบเกิดแนวความคิดใหม่ๆ ในการสร้างและใช้แบบจำลองอย่างละเอียดถี่ถ้วนมากขึ้น
- 4) เพื่อใช้แบบจำลองคาดการณ์หรือพยากรณ์ว่าระบบจะแสดงพฤติกรรมอย่างไร ถ้าสิ่งหนึ่งสิ่งใดหรือหลายสิ่งในระบบแปรผันไป
- 5) เพื่อเป็นเครื่องมือชี้ให้เห็นว่าอะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างๆ ที่บ่งบอกได้ถึงแนวทางในการจัดการ

แบบจำลองทางคณิตจะแสดงถึงความจริงหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเป็นจริงและพฤติกรรมของสิ่งนั้น ข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลอง เรียกว่า ข้อมูลเข้า (input data) และผลที่ได้รับจากแบบจำลอง เรียกว่า ข้อมูลออก (output data) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออก เรียกว่า ฟังก์ชันโอนถ่าย (transfer function) ดังแสดงในภาพที่ ง.1



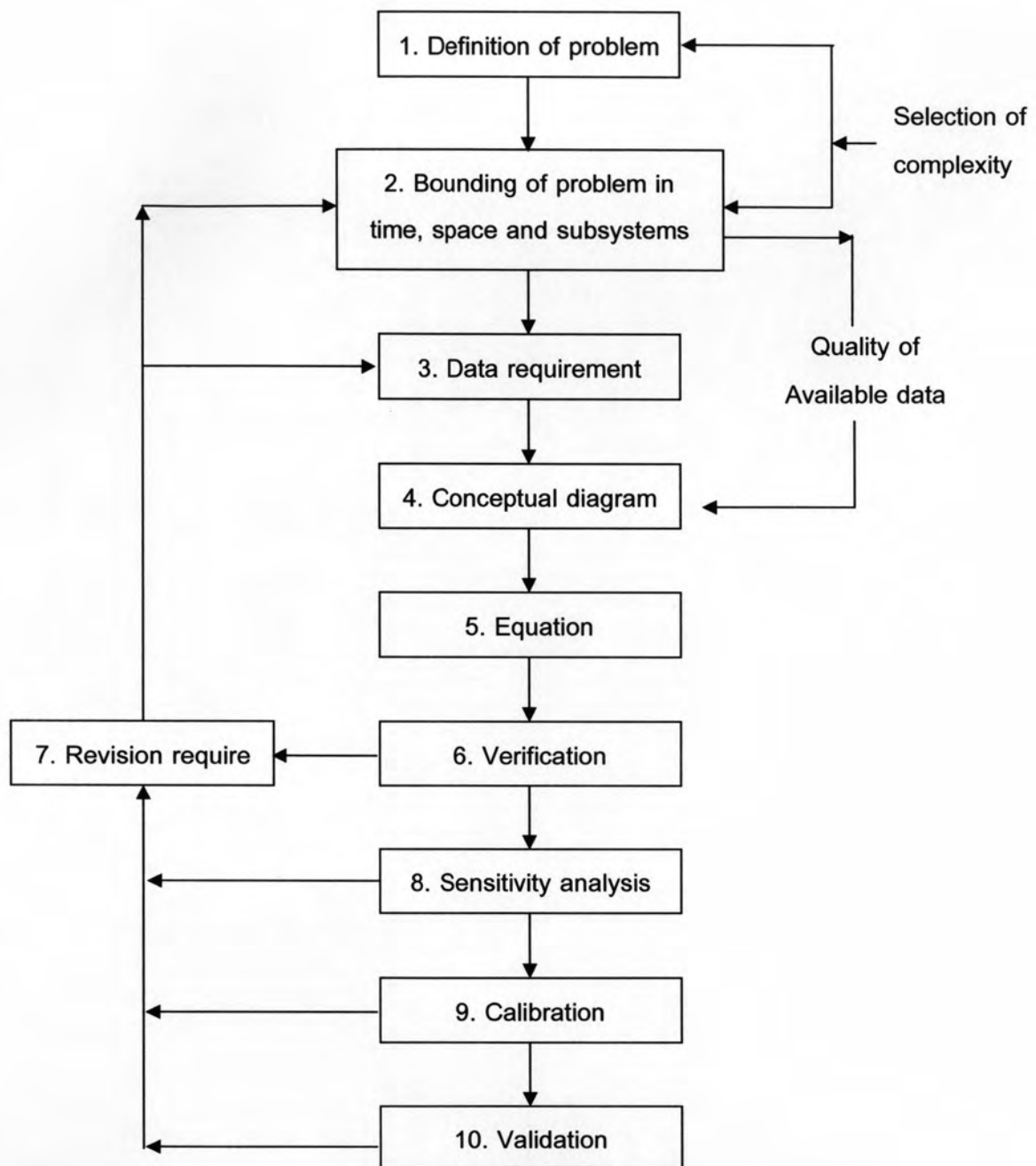
ภาพที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเข้าและข้อมูลออก

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ว่าจะเป็นระบบง่าย ๆ หรือระบบที่ สลับซับซ้อนกระบวนการหลักๆ จะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในภาพที่ ง.2



ภาพที่ ง.2 กระบวนการหลักในการสร้างแบบจำลองของระบบ

จากภาพที่ ง.2 จะเห็นว่าในการสร้างแบบจำลองนั้น แบบจำลองจะทำงานให้คำตอบตามวัตถุประสงค์หรือไม่ขึ้นกับความรู้ ความเข้าใจ ความชำนาญ และวัตถุประสงค์ของผู้สร้าง ซึ่งถ้าผู้สร้างเข้าใจทั้งโครงสร้างและหน้าที่ของระบบอย่างดีแล้วก็จะสามารถสร้างแบบจำลองที่เลียนแบบระบบที่แท้จริงได้ อย่างไรก็ตามยังต้องขึ้นกับเวลา บุคลากร และงบประมาณเป็นองค์ประกอบหลักด้วย การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มักใช้ทฤษฎีที่มีอยู่แล้วผนวกกับแนวคิดของผู้สร้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการสำรวจจากพื้นที่จริง และใช้ระบบที่เป็นอยู่จริงเป็นเครื่องมือทดสอบ หากแบบจำลองที่สร้างสามารถตอบคำถามที่กำหนดไว้ในวัตถุประสงค์ได้อย่างพอใจแล้ว ก็เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการสร้าง แต่ถ้ายังมีข้อผิดพลาดอยู่ผลจากข้อมูลออกจะบ่งชี้ว่าควรแก้ไขตรงไหน อย่างไร กระบวนการดังกล่าวมีขั้นตอนที่กำหนดให้ผู้สร้างแบบจำลองดำเนินการได้ดังภาพที่ ง.3



ภาพที่ ง.3 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบต่างๆ

ซึ่งอธิบายโดยย่อได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไข เพื่อใช้กำหนดรูปแบบและทิศทางของแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดกรอบของปัญหาให้อยู่ในรูปของเวลา พื้นที่ และระบบย่อยของระบบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3 ความต้องการในข้อมูล ซึ่งจะมีปริมาณและคุณภาพมากน้อยเพียงใดขึ้นกับความสลับซับซ้อนของแบบจำลองที่จะสร้างข้อมูลที่มีอยู่แล้ว

ในขั้นตอนที่ 1-3 มักจะถูกจำกัดด้วยงบประมาณ เวลา และข้อมูลที่มีอยู่ ผู้สร้างแบบจำลองที่เริ่มต้นใหม่ๆ ที่มีความเข้าใจในโครงสร้างและการทำงานเป็นอย่างดีมักจะออกแบบโครงสร้างของแบบจำลองที่เกินขีดจำกัดของงบประมาณ เวลา และข้อมูลที่มีอยู่เสมอ

ขั้นตอนที่ 4 เขียนโครงสร้างของแบบจำลองจากแนวคิดที่ผู้สร้างมีอยู่หรือจากกลุ่มผู้สร้าง ขั้นตอนนี้อาจทำก่อนขั้นตอนรวบรวมข้อมูล แต่มักจะถูกจำกัดด้วยข้อมูลที่มีอยู่ การเขียนโครงข่ายของแบบจำลองจึงมักทำภายหลังจากที่ทราบปริมาณและคุณภาพของข้อมูลแล้ว

ขั้นตอนที่ 5 สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์และความสัมพันธ์ของระบบที่เชื่อมโยงกับการให้คำตอบของปัญหาที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 ในขั้นตอนนี้จะคำนึงถึง

- 1) จะให้แบบจำลองตัดสินใจแก้ปัญหาให้คำตอบเรื่องอะไร ในระดับใด
- 2) จำแนกองค์ประกอบ (ตัวแปร) ของแบบจำลองที่จะเป็นตัวกำหนด (regulate) และตัวผลลัพธ์ให้ครบถ้วน
- 3) สร้างความสัมพันธ์เชื่อมโยงตัวแปรต่างๆ ด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยผลงานวิจัยที่ผ่านมาหรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก
- 4) กำหนดพารามิเตอร์ที่จะเป็นข้อมูลออก อินดิเคเตอร์ กำหนดช่วงเวลา (time interval) และระยะเวลา (time span) ที่จะให้แบบจำลองหาคำตอบให้
- 5) ผนวกแบบจำลองย่อยต่างๆ เข้าด้วยกันอย่าง

ขั้นตอนที่ 6 ทดลองการทำงานของแบบจำลองและความถูกต้องของผลลัพธ์ เมื่อเชื่อมโยงสมการหรือแบบจำลองย่อยต่างๆ เข้าด้วยกันแล้ว ถ้าเป็นขั้นตอนทดสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำงานหรือคำนวณได้ตามต้องการหรือไม่ มีความถูกต้องตามหลักตรรกะ และอธิบายความเป็นไปของกระบวนการ

ต่างๆ ได้ตามที่คิดไว้หรือไม่ ขั้นตอนนี้ส่วนมากมักใช้ข้อมูลที่มีอยู่แล้วในอดีตเป็นตัวทดสอบ

ขั้นตอนที่ 7

การแก้ไขปรับปรุงแบบจำลอง กรณีที่การทำงานยังไม่ดีพอ ซึ่งอาจเกิดจากแบบจำลองยังไม่สมบูรณ์ การเชื่อมต่อกันยังไม่เป็นไปตามตรรกะ รายละเอียดในแบบจำลองยังไม่เพียงพอ หรือตั้งวัตถุประสงค์ไว้มากกว่าข้อมูลที่มีอยู่จะหาคำตอบได้ ก็จะต้องมีการทบทวนกันใหม่ โดยกลับไปเริ่มที่ขั้นตอนที่ 2 จะทำให้ได้แบบจำลองที่ให้ความพอใจได้

ขั้นตอนที่ 8

ในกรณีที่แบบจำลองทำงานได้ดีแล้ว มีความถูกต้องแม่นยำตามที่ตั้งเกณฑ์ไว้ ก็จะต้องมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในแบบจำลอง (sensitivity analysis) ว่าเมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ต่างๆ คงที่แล้ว การเปลี่ยนพารามิเตอร์ตัวหนึ่งไปในระดับต่างๆ จะทำให้มีผลลัพธ์ออกมาแตกต่างกันไปจากเดิมอย่างมีตรรกะและระดับการเปลี่ยนแปลงยอมรับได้หรือไม่ ถ้ายังไม่ตอบสนองในระดับที่ดีพอ ก็จะต้องกลับไปเริ่มขั้นตอนที่ 7 คือทบทวนแบบจำลองกันใหม่อีกจนพอใจ

ขั้นตอนที่ 9

เป็นการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ในแบบจำลอง ขั้นตอนนี้มักจะทำการันเสมอในแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าตรงหรือใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง หรือที่ควรจะเป็น ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองนั้นมีโอกาสเลียนแบบของจริงได้ 100% ค่าที่ได้จึงมักคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง จึงต้องมีการเปรียบเทียบ

ขั้นตอนที่ 10

เป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อทดสอบว่าแบบจำลองทำงานได้ดีและถูกต้องเพียงใด เมื่อกำหนดสภาวะต่างๆ ในการจัดการระบบเปลี่ยนไป ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนการตรวจประสิทธิภาพและประสิทธิผลของแบบจำลองว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลภายนอกที่เป็นข้อมูลเข้าแล้ว แบบจำลองจะทำงานได้สมเหตุสมผลหรือไม่ ซึ่งถ้ามาถึงขั้นตอนนี้แล้วแบบจำลองให้ผลถูกต้องแน่นอนและมีตรรกะในทุกกรณี ก็ถือได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นๆ เพื่อหาคำตอบมาช่วยในการกำหนดนโยบายการจัดการได้เป็นอย่างดี

ภาคผนวก จ

การประเมินภาระมลพิษของแม่น้ำแม่กลองตอนบน

ตารางที่ จ.1 ภาระมลพิษจากแหล่งกำเนิดชุมชน

จังหวัด	เทศบาล	อำเภอ	ประชากร (คน)	ปริมาณการ ใช้น้ำรวม (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณ น้ำเสีย ลบ.ม./วัน	BOD load กก./วัน
กาญจนบุรี	เทศบาลตำบลท่าม่วง	ท่าม่วง	11,502	2,242.89	2,153.17	262.69
	เทศบาลตำบลท่าเรือ	ท่ามะกา	13,067	2,548.07	2,446.14	298.43
	เทศบาลตำบลท่าไม้	ท่ามะกา	8,628	1,682.46	1,615.16	197.05
	เทศบาลตำบลพระแท่น	ท่ามะกา	5,783	1,127.69	1,082.58	132.07
	เทศบาลตำบลห้วยเหนียว	ท่ามะกา	4,273	833.24	799.91	97.59
	เทศบาลตำบลท่ามะกา	ท่ามะกา	8,461	1,649.90	1,583.90	193.24
ราชบุรี	เทศบาลเมืองบ้านโป่ง	บ้านโป่ง	25,260	4,925.70	4,728.67	576.90
	เทศบาลตำบลท่าผา	บ้านโป่ง	20,693	4,035.14	3,873.73	472.60
	เทศบาลเมืองโพธาราม	โพธาราม	12,172	2,373.54	2,278.60	277.99
	เทศบาลตำบลเจ็ดเสมียน	โพธาราม	3,761	733.40	704.06	85.90
รวม			113,600	22,152.00	21,265.92	2,594.44

ตารางที่ จ.2 ภาระมลพิษจากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรม

ชื่อ	อำเภอ	ปริมาณ น้ำทิ้ง (ลบ.ม./วัน)	ค่า BOD (mg/l)	BOD load (kg/day)
บริษัท ไทยเคนเปเปอร์ จำกัด (มหาชน)	ท่าม่วง	2,100.00	32.55	68.36
บริษัท แสงโสม จำกัด	ท่าม่วง	630.00	16,317.00	10,279.71
โรงงานสุรากรมสรรพสามิต จ.กาญจนบุรี	ท่าม่วง	700.00	20.00	14.00
บริษัท น้ำตาลวังขนาย จำกัด	ท่าม่วง	1,800.00	20.00	36.00
บริษัท แป้งมันเอเซีย จำกัด	ท่าม่วง	1,800.00	52.20	93.96
บริษัท กระดาษสหไทยอุตสาหกรรม จำกัด	ท่าม่วง	1,261.74	20.00	25.23
บริษัท อุตสาหกรรมกระดาษกราฟท์ไทย จำกัด	ท่าม่วง	13,981.68	20.00	279.63
บริษัท อุตสาหกรรมกระดาษกราฟท์ไทย จำกัด	ท่าม่วง	40,952.00	819.00	33,539.69
บริษัท น้ำตาลท่ามะกา จำกัด	ท่ามะกา	800.00	20.00	16.00
บริษัท ประจวบอุตสาหกรรม จำกัด	ท่ามะกา	500.00	20.00	10.00
บริษัท น้ำตาลไทยกาญจนบุรี จำกัด	ท่ามะกา	950.00	20.00	19.00
บริษัท เยื่อกระดาษสยาม จำกัด	บ้านโป่ง	752.90	20.00	15.06
บริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด	บ้านโป่ง	9,910.68	20.00	198.21
บริษัท ผลิตภัณฑ์กระดาษไทย จำกัด	บ้านโป่ง	6,514.10	20.00	130.28

ตารางที่ จ.2 (ต่อ)

ชื่อ	อำเภอ	ปริมาณน้ำทิ้ง (ลบ.ม./วัน)	ค่า BOD (mg/l)	BOD load (kg/day)
บริษัท ผลิตภัณฑ์กระดาษไทย จำกัด	บ้านโป่ง	1,996.48	20.00	39.93
บริษัท น้ำตาลบ้านโป่ง จำกัด	บ้านโป่ง	4,475.73	20.00	89.51
รวม		89,125.31		44,854.58

ตารางที่ จ.3 ภาระมลพิษจากสุกร

อำเภอ	จังหวัด	จำนวนสุกร (ตัว)	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	คิดเป็น ร้อยละ50	BOD load (กก./วัน)
ท่าม่วง	กาญจนบุรี	570	22.80	11.40	38.76
ท่ามะกา	กาญจนบุรี	8,363	334.52	167.26	568.68
บ้านโป่ง	ราชบุรี	4,890	195.60	97.80	332.52
โพธาราม	ราชบุรี	27,774	1,110.96	555.48	1,888.63
รวม		41,597	1,663.88	831.94	2,828.60

ตารางที่ จ.4 ภาระมลพิษจากไก่

อำเภอ	จังหวัด	จำนวนไก่ (ตัว)	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	คิดเป็น ร้อยละ50	BOD load (กก./วัน)
ท่าม่วง	กาญจนบุรี	43,582	740.89	370.45	65.37
ท่ามะกา	กาญจนบุรี	110,756	1,882.85	941.43	166.13
บ้านโป่ง	ราชบุรี	278,163	4,728.77	2,364.39	417.24
โพธาราม	ราชบุรี	57,269	973.57	486.79	85.90
รวม		489,770	8,326.09	4,163.05	734.65

ตารางที่ จ.5 ภาระมลพิษจากโค

อำเภอ	จังหวัด	จำนวนโค (ตัว)	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	คิดเป็น ร้อยละ50	BOD load (กก./วัน)
ท่าม่วง	กาญจนบุรี	3641	546.15	273.08	247.59
ท่ามะกา	กาญจนบุรี	10287	1543.05	771.53	699.52
บ้านโป่ง	ราชบุรี	7442	1116.30	558.15	506.06
โพธาราม	ราชบุรี	12185	1827.75	913.88	828.58
รวม		33555	5033.25	2516.63	2281.75

ตารางที่ จ.6 ภาระมลพิษจากปลา

อำเภอ	จังหวัด	พื้นที่เลี้ยงปลา (ไร่)	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	คิดเป็น ร้อยละ50	BOD load (กก./วัน)
ท่าม่วง	กาญจนบุรี	502.52	2201.04	1100.52	19.81
ท่ามะกา	กาญจนบุรี	455.32	1994.30	997.15	17.95
บ้านโป่ง	ราชบุรี	691.93	3030.65	1515.33	27.28
โพธาราม	ราชบุรี	293.43	1285.22	642.61	11.57
รวม		1943.2	8511.22	4255.61	76.60

ตารางที่ จ.7 ภาระมลพิษจากการเกษตรกรรม

ชนิดพืช	พื้นที่	ปริมาณการใช้น้ำ	return flow 20%	BOD load
	(ตร.กม.)	(ลบ.ม./ปี)	(ลบ.ม./ปี)	(kg/d)
นาข้าว	403.39	504,240,455.00	100,848,091.00	1,058.21
ไม้ผลและพืชไร่	1,007.47	2,203,840,625.00	440,768,125.00	4,625.05
ป่าไม้	44.97	112,423,045.00	22,484,609.00	369.61
รวม	1,455.83	2,820,504,125.00	564,100,825.00	6,052.87



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนกทัศน์ ยลปราโมทย์ เกิดวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ.2524 จบการศึกษาปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี
การศึกษา 2545 และเข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม คณะ
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคต้นปีการศึกษา 2547