บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดในการจัดการคุณภาพน้ำในอดีตและปัจจุบัน

2.1.1 แนวคิดในการจัดการคุณภาพน้ำภาพรวม

มลพิษในแหล่งน้ำเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในการอุปโภค บริโภค และการประกอบอาชีพ เช่น การเกษตรกรรม การปศุสัตว์ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการอุตสาหกรรม ซึ่งกิจกรรมส่วนใหญ่นั้นต้องการน้ำที่มีคุณภาพที่ดีในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเพื่อการบริโภค และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่จากการเร่งพัฒนาภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจากการปฏิวัติอุสาหกรรม ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการทำเกษตรกรรมอย่างหนาแน่น ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก โดยน้ำเสียเกือบทั้งหมดจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้โลกต้องเผชิญกับปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ

จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ โลกเริ่มตระหนักถึงความสำคัญของปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ โดยโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme; UNEP) ได้ทำการจัดตั้งระบบตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโลก (Global Environment Monitoring System; GEMS) ขึ้นใน ปี ค.ศ.1978 เพื่อทำการตรวจติดตามสถานการณ์สิ่งแวดล้อมของโลก และเสนอนโยบายในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยในปี ค.ศ.1988 GEMS ได้เสนอมาตรการในการควบคุมแหล่งปนเปื้อนทางน้ำ ไว้ดังนี้

- กำหนดข้อบังคับในการกำจัดน้ำเสีย
- จัดทำโครงการบำบัดน้ำเสียของเมือง
- สร้างโรงบำบัดน้ำเสีย
- บำบัดน้ำเสียที่ปล่อยจากโรงงานและนำกลับมาใช้ใหม่
- ใช้สารทดแทนสารที่เป็นอันตรายต่างๆ ที่มีในผลิตภัณฑ์
- ห้ามใช้สารปราบศัตรูพืชและสัตว์ที่เป็นอันตราย เช่น DDT และสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น PCB

โดยมาตรการเหล่านี้ถึงแม้จะไม่สามารถแก้ปัญหาได้ทั้งหมด แต่ก็ทำให้สารมลพิษในประเทศอุตสาหกรรมในหลายประเทศลดลง ส่วนในประเทศกำลังพัฒนายังขาดกฎข้อบังคับและการควบคุม ทำให้ยังคงพบปัญหามลพิษในแหล่งน้ำอยู่ทั่วไป

นอกจากมาตรการในการควบคุมแหล่งปนเปื้อนทางน้ำแล้ว ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันยังมีการเสนอแนวคิดในเรื่อง "ผู้ใดก่อมลพิษผู้นั้นต้องชดใช้" (Polluter Pay Principal; PPP) อีกด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วแนวคิดนี้เป็นเพียงแนวคิดเชิงทฤษฎีเท่านั้น

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทางปฏิบัติแล้วโรงงานต่างๆ ยอมที่จะเสียค่าปรับเป็นครั้งคราว ซึ่งคิดเป็นมูลค่าที่น้อยกว่าการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหรือบำบัดน้ำเสีย ซึ่งต้องลงทุนสูงและใช้ระยะเวลานานในการคืนเงินลงทุน

จะเห็นได้ว่ามาตรการหรือแนวคิดต่างๆ ที่มีการเสนอกันในอดีต เป็นมาตรการที่เกิดขึ้นหลังจากที่แหล่งน้ำเกิดปัญหามลพิษแล้ว หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นมาตรการในการฟื้นฟูแหล่งน้ำ แต่สิ่งที่สำคัญในการแก้ไขปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ คือ การวางแนวทางในการป้องกันการเกิดปัญหามลพิษ

โดยเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวางแผนจัดการคุณภาพน้ำ ได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เนื่องจากเราสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการคาดการณ์คุณภาพน้ำในอนาคตเพื่อกำหนดแนวทางในการจัดการคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อแหล่งน้ำนั้นๆ ได้ โดยงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดการคุณภาพน้ำตั้งแต่ช่วงทศวรรศที่ 1980 เป็นต้นมา จะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจัดการคุณภาพน้ำ โดยนอกจากจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์คุณภาพน้ำแล้ว ยังมีประเด็นที่มีความสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการวางแผนจัดการคุณภาพน้ำ ได้แก่ ความสามารถในการรองรับมลพิษ (pollution load capacity) ของแหล่งน้ำประเภทต่างๆ เนื่องจากความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำจะบอกถึงปริมาณภาระมลพิษ (load) ที่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้โดยไม่ทำให้แหล่งน้ำนั้นๆ มีคุณภาพน้ำต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำที่กำหนด ดังนั้นในการวางแนวทางเพื่อการจัดการคุณภาพน้ำในปัจจุบันจึงควรทำการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำนั้นๆ ด้วย ดังเช่นในประเทศสหรัฐอเมริกา นำโดยองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐ (United State Environmental Protection Agency; USEPA) ได้มีการประกาศไว้ในกฎหมายว่า ทุกรัฐในประเทศสหรัฐอเมริกาจะต้องทำการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำที่ USEPA กำหนดไว้ และทำการตรวจติดตามคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง

2.1.2 แนวคิดในการจัดการคุณภาพน้ำในประเทศ

แนวคิดในการจัดการคุณภาพน้ำในประเทศไทยในอดีตจะมีความคล้ายคลึงกันกับการจัดการคุณภาพน้ำทั่วโลก คือ เน้นในการวางแนวทางในการฟื้นฟูมากกว่าการวางแผนป้องกัน ดังจะเห็นได้จาก กรณีการสั่งปิดโรงงานหากพบว่าแหล่งน้ำบริเวณโรงงานเกิดการเน่าเสีย หรือการเร่งสร้างระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนตามเมืองต่างๆ แต่หลังจากมีการออกประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2537) ว่าด้วยเรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้กรมควบคุมมลพิษซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในการจัดการด้านมลพิษทางสิ่งแวดล้อมของประเทศ จัดทำโครงการจัดการคุณภาพน้ำและจัดทำแผนปฏิบัติการในพื้นที่ลุ่มน้ำหลักของประเทศ โดยโครงการดังกล่าวใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญในการคาดการณ์คุณภาพน้ำเพื่อเสนอแผนปฏิบัติการที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่

นอกจากนี้ในประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2537) ว่าด้วยเรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ยังได้มีการกำหนดคุณภาพของแม่น้ำสายหลักของประเทศ เพื่อให้แม่น้ำสายหลักมีคุณภาพน้ำที่ดีพอต่อการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำให้มีมาตรฐานตามต้องการ ทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการคุณภาพน้ำให้ความสนใจการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแม่น้ำสายหลักที่เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา จึงอาจกล่าวได้ว่า ในปัจจุบันการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำ หากต้องการวางแผนในการจัดการคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำใดก็ตาม

2.2 ความสามารถในการรองรับมลพิษสูงสุดต่อวัน (Total Maximum Daily Load; TMDL)

รูปแบบหนึ่งของการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ คือ การประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษสูงสุดต่อวัน หรือ Total Maximum Daily Load (TMDL) โดย TMDL หมายถึง ปริมาณมลสารสูงสุดที่แหล่งน้ำสามารถรองรับได้ต่อวัน โดยไม่ทำให้คุณภาพน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อวัน (kg/day) (USEPA, n.d.) การกำหนดให้มีการประเมิน TMDL เกิดขึ้นสืบเนื่องจากกฎหมาย Clean Water Act ของประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.1972 โดยจุดมุ่งหมายของกฎหมายฉบับนี้ คือ

1) ควบคุมคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อให้สามารถเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจให้ได้ภายใน เดือนกรกฎาคม ปี ค.ศ. 1983

2) กำจัดแหล่งปล่อยน้ำเสียลงให้ได้ภายในปี ค.ศ. 1985

3) กำจัดแหล่งปล่อยสารพิษที่มีค่าเกินมาตรฐาน

4) พัฒนาแผนการควบคุมมลพิษจากแหล่งกำเนิดที่ไม่แน่นอนและดำเนินการตามแผน

จากจุดมุ่งหมายของกฎหมายฉบับดังกล่าว ทำให้ USEPA เล็งเห็นความสำคัญของการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ จึงเสนอให้มีการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำสำคัญๆ ในทุกรัฐ โดยให้ประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษในรูปแบบของความสามารถในการรองรับมลพิษสูงสุดต่อวัน หรือ TMDL เพื่อให้ง่ายในการนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผน เนื่องจาก TMDL จะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณมลพิษที่สามารถถ่ายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำได้ต่อวัน ที่จะไม่ทำให้คุณภาพน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

โดยพารามิเตอร์ที่มักจะทำการประเมิน TMDL ได้แก่ ปริมาณความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ปริมาณสารอาหารต่างๆ (nutrient) เช่น ไนเตรต ฟอสเฟต และปริมาณสารพิษ (toxic substance)

2.3 หลักการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษสูงสุดต่อวัน

หลักการของการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ คือ การทดลองเพิ่มภาระมลพิษ (load) ลงสู่แหล่งน้ำ แล้วตรวจติดตาม (monitoring) คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้นว่ามีค่าเท่ากับหรือเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ โดยปริมาณ load ที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วทำให้น้ำในแหล่งน้ำนั้นๆ มีค่าเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ถือได้ว่าเป็นค่าความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำนั้นๆ

แต่ในความเป็นจริงแล้ว เราไม่สามารถทำการทดลองเช่นนั้นได้ กล่าวคือ เราไม่สามารถปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติที่ยังมีคุณภาพน้ำที่ดีอยู่เพื่อสังเกตว่าต้องปล่อยภาระมลพิษในปริมาณเท่าใดคุณภาพน้ำจะถึงเกณฑ์ที่กำหนด หรือในทางกลับกัน หากแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาเป็นแหล่งน้ำที่มีค่าคุณภาพน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดอยู่แล้ว แนวทางที่กล่าวไว้ข้างต้นย่อมทำไม่ได้

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่มนุษย์ใช้เพื่อจำลองสภาพ (simulate) ของปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นไม่ว่าสิ่งนั้นจะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือเป็นสิ่งที่มนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องด้วย (ทวีวงศ์ ศรีบุรี, 2541) โดยเราสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผลตามเงื่อนไขการจัดการ (scenario) ที่เรากำหนดได้ เช่น หากแหล่งน้ำที่เราทำการศึกษามีคุณภาพน้ำที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เราก็สามารถกำหนด scenario ให้เป็นการเพิ่ม load จนกระทั่งคุณภาพน้ำเท่ากับเกณฑ์มาตรฐาน ในทางกลับกัน หากแหล่งน้ำที่เราทำการศึกษามีคุณภาพน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ก็ควรกำหนด scenario ให้เป็นการลด load จนกระทั่งคุณภาพน้ำมีค่าเท่ากับเกณฑ์มาตรฐาน

โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษสูงสุดต่อวัน มีหลักการดังนี้

1) ปรับเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2) กำหนดค่าเป้าหมายคุณภาพน้ำของพารามิเตอร์ที่ต้องการประเมินค่า TMDL

3) กำหนดเงื่อนไขการจัดการ (scenario) เพื่อจำลองสภาพการปล่อยของเสีย โดยรวมกรณีวิกฤต (worse case) เอาไว้ด้วย เช่น กรณีที่แม่น้ำมีอัตราการไหลต่ำสุดในรอบปี หรือกรณีที่โรงบำบัดน้ำเสียปิดระบบ เป็นต้น

4) ป้อนข้อมูลที่จำเป็นเข้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับเทียบแล้วเพื่อประมวลผลตาม scenario ที่กำหนดไว้

5) นำค่าคุณภาพน้ำที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละ scenario มาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อพิจารณาว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองเกินเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่

6) เลือก scenario ที่ประมวลผลด้วยแบบจำลองแล้วค่าคุณภาพน้ำไม่เกินค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 และใช้ scenario นั้นเป็นพื้นฐานในการคำนวณค่า TMDL โดยค่า TMDL ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

$$TMDL = \sum WLA + \sum LA + MOS \qquad (2.1)$$

โดยที่

WLA = Waste Load Allocation for Point Sources Discharge

LA = Load Allocation for Non-point sources

MOS = Margin of Safety

2.4 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการคุณภาพน้ำ

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญในการวางแผนการจัดการคุณภาพน้ำ จึงมีการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับงานด้านคุณภาพน้ำกันอย่างต่อเนื่อง โดยการสร้างแบบจำลองคุณภาพน้ำเริ่มต้นในปี ค.ศ.1925 Streeter และ Phelps ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายโดยอาศัยหลักการสมดุลออกซิเจนในแม่น้ำโอไฮโอ (Ohio River) แบบจำลองนี้ถือเป็นแบบจำลองแรกที่เกิดขึ้น โดยเรียกว่าแบบจำลอง DOSAG ภายหลังจากที่แบบจำลอง DOSAG เกิดขึ้น ได้มีการพัฒนาแบบจำลองอื่นๆ ตามมา ทั้งที่พัฒนาต่อเนื่องจากแบบจำลอง DOSAG และที่คิดค้นขึ้นใหม่ (Thomann et al., 1987 อ้างถึงใน ทวีวงศ์ ศรีบุรี, 2541) โดยอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

1) แบบจำลอง DOSAG หรือแบบจำลอง Streeter-Phelps

เป็นแบบจำลองแรกที่เกิดขึ้น โดยสามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ อาศัยการคำนวณคำตอบจากสมการของ Streeter-Phelps (DO sag equation) ซึ่งเป็นสมการคงที่แบบ 1 มิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกซิเจนละลายและค่า BOD มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถจำลองการแพร่กระจายมลสารในแนวยาว (longitudinal dispersion) ได้ ใช้จำลองพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ออกซิเจนละลายและค่า BOD

ในปี ค.ศ.1970 Texas Water Development Board ได้พัฒนาแบบจำลอง DOSAG I ขึ้นจากแบบจำลอง DOSAG ให้มีความสามารถสูงขึ้นโดยการปรับปรุงสมการของ Streeter-Phelps ทำให้สามารถคำนวณค่าออกซิเจนละลายและค่า BODได้ละเอียดมากขึ้น โดยการเพิ่มการเติมอากาศ การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบคาร์บอนและไนโตรเจนได้

2) แบบจำลอง QUAL

แบบจำลอง QUAL I เป็นแบบจำลองที่พัฒนาจากแบบจำลอง DOSAG ในปี ค.ศ. 1970 โดย Texas Water Development Board ซึ่งแบบจำลอง QUAL I มีความสามารถสูงขึ้น คือ สามารถจำลองพารามิเตอร์คุณภาพน้ำได้เพิ่มขึ้น 2 ตัว คือ อุณหภูมิ และมลสารประเภทคงที่ตามเวลา (conservative substance) ใช้สมการคงที่ 1 มิติ แต่สามารถจำลองการนำเข้าข้อมูลปริมาณของเสียแบบพลวัติได้ (dynamic waste input) และสามารถจำลองการแพร่กระจายของสารได้ ซึ่งให้ผลการทำนายคุณภาพน้ำได้ถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง DOSAG

ในปี ค.ศ.1972 Water Resource Engineer, Inc. (WRE) ภายใต้ข้อตกลงกับ USEPA ทำการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลอง QUAL I เป็นแบบจำลอง QUAL II (เวอร์ชัน 1.0) ต่อมาในปี ค.ศ.1976 โดยความร่วมมือระหว่าง WRE และ the Southeast Michigan Council of Government (SEMCOG) ได้พัฒนาต่อเนื่องได้เป็นแบบจำลอง QUAL II (เวอร์ชัน SEMCOG) เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถจำลองพารามิเตอร์ได้ถึง 12 ตัว ได้แก่ ออกซิเจนละลาย ค่า BOD คลอโรฟิลล์ เอ แอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท ฟอสฟอรัส โคลิฟอร์ม สารกัมมันตรังสี อุณหภูมิ และสารประเภทคงที่ตามเวลา แบบจำลอง QUAL II ได้รับการรายงานถึงการใช้ในการคาดการณ์คุณภาพน้ำ ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในยุโรปและสหรัฐอเมริกา

แบบจำลอง QUAL-2E เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาต่อเนื่องจากแบบจำลอง QUAL II โดย SEMCOG ในปี ค.ศ.1985 เป็นแบบจำลองที่ใช้จำลองกลไกการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของสารในลักษณะทิศทางเดียว สามารถจำลองพารามิเตอร์คุณภาพน้ำได้สูงสุดถึง 15 ตัว และต่อมาได้มีการปรับปรุงแบบจำลองอย่างต่อเนื่อง ได้แก่แบบจำลองต่างๆ เช่น แบบจำลอง QUAL-2E/UNDES และแบบจำลอง QUAL-2K เป็นต้น

3) แบบจำลอง MIKE 11

Danish Hydraulic Institute (DHI) ประเทศเดนมาร์กได้พัฒนาโปรแกรม MIKE 11 (A Microcomputer Based Modeling System for River and Channels) ในปี ค.ศ.1972 เพื่อใช้ในการออกแบบจัดการลุ่มน้ำและระบบโครงข่ายของลำคลอง เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบจำลองพื้นฐานสำหรับคลองและแม่น้ำ ใช้จำลองสภาพการไหล (hydrodynamic) การแพร่กระจายของสาร (Transport Dispersion) การเคลื่อนที่และการทับถมของตะกอน (sediment transport) และการจำลองคุณภาพน้ำ (water quality simulation) ในบริเวณปากแม่น้ำ แม้น้ำลำคลอง และระบบชลประทาน เป็นการจำลองแบบ 1 มิติ

4) แบบจำลอง WASP (Wool et al., 2005)

แบบจำลอง WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดย USEPA ตั้งแต่ปี ค.ศ.1983 ในช่วงแรกแบบจำลอง WASP ถูกใช้เพื่อแก้ปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันของแหล่งน้ำในประเทศอเมริกา แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลอง WASP ให้สามารถจำลองพารามิเตอร์คุณภาพน้ำได้มาขึ้นโดยแบ่งเป็น 2 แบบจำลองย่อย คือ แบบจำลองย่อย EUTRO สำหรับจำลองพารามิเตอร์คุณภาพน้ำโดยทั่วไป

เช่น ค่าออกซิเจนละลาย ค่า BOD ไนเตรต ฟอสเฟต เป็นต้น และ แบบจำลองย่อย TOXI สำหรับจำลองพารามิเตอร์ประเภทสารพิษ เช่น โลหะหนัก สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น นอกจากนี้ แบบจำลอง WASP ยังสามารถเชื่อมต่อกับแบบจำลองอุทกศาสตร์ เพื่อนำเข้าข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของน้ำที่จำเป็นในการจำลองการเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำ โดยสามารถเชื่อมต่อได้ทั้งแบบจำลองอุทกศาสตร์แบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ ปัจจุบันแบบจำลองอุทกศาสตร์ที่นิยมใช้เชื่อมต่อกับแบบจำลอง WASP มากที่สุด คือ แบบจำลอง DYNHYD

แบบจำลอง WASP ถือเป็นแบบจำลองหนึ่งที่เหมาะสมในการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ออกแบบมาให้มีฟังก์ชันที่สะดวกในการเพิ่มหรือลด load ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งขั้นตอนการปรับ load ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำ

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

2.5.1 แบบจำลองอุทกศาสตร์ (Hydrodynamics Model)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลอง RMA2 เวอร์ชัน 4.5 เป็นแบบจำลองอุทกศาสตร์ โดยแบบจำลอง RMA2 เป็นแบบจำลองย่อย (module) แบบจำลองหนึ่งในแบบจำลอง SMS8.1 (Surface Water Modeling System) ที่พัฒนาโดย USA ERDC (United State Army, Engineering Research and Development Center) ตั้งแต่ปี ค.ศ.1973 โดยในปัจจุบันได้พัฒนามาถึง เวอร์ชัน SMS9.2

แบบจำลอง RMA2 เป็นแบบจำลองอุทกศาสตร์ที่สามารถจำลองสภาพการไหลได้แบบ 2 มิติ โดยแบบจำลอง RMA2 จะสมมติให้แหล่งน้ำที่ทำการจำลองมีความลึกเท่ากันตลอด และทำการแก้สมการเพื่อหาค่าความเร็วของการไหลด้วยวิธี finite element ซึ่งแบบจำลอง RMA2 สามารถจำลองสภาพการไหลได้ทั้งการไหลแบบคงที่ (steady state) และการไหลแบบไม่คงที่ (dynamics state) (US Army, 2001)

โดยสมการที่ใช้ในแบบจำลอง RMA2 (governing equations) ได้แก่

$$h\frac{\partial u}{\partial t}+hu\frac{\partial u}{\partial x}+hv\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left[E_{xx}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+E_{xy}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right]+gh\left[\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{gun^2}{\left(1.486h^{1/6}\right)^2}\left(u^2+v^2\right)^{1/2}$$

$$-\zeta V_a^2\cos\psi-2hv\omega\sin\Phi=0 \qquad (2.2)$$

$$h\frac{\partial v}{\partial t}+hu\frac{\partial v}{\partial x}+hv\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{h}{\rho}\left[E_{yx}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+E_{yy}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right]+gh\left[\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{gvn^2}{\left(1.486h^{1/6}\right)^2}\left(u^2+v^2\right)^{1/2}$$

$$-\zeta V_a^2\cos\psi+2hv\omega\sin\Phi=0 \qquad (2.3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+h\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y}=0 \qquad (2.4)$$

โดยที่ h = water depth

u, v = velocities in the Cartesian directions

x, y, t = Cartesian coordination and time

ρ = density of fluid

E = eddy viscosity coefficient,

for xx = normal direction on x axis surface

for yy = normal direction on y axis surface

for xy and yx = shear direction on each surface

g = acceleration due to gravity

a = elevation of bottom

n = Manning's roughness

1.486 = conversion from SI (metric) to non-SI units

ζ = empirical wind shear coefficient

V_a = wind speed

ψ = wind direction

ω = rate of earth's angular rotation

Φ = local latitude

โดยในการปรับเทียบแบบจำลอง RMA2 จะทำการปรับเทียบค่า eddy viscosity และค่า Manning's roughness

2.5.2 แบบจำลองคุณภาพน้ำ (Water Quality Model)

แบบจำลองคุณภาพน้ำที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ แบบจำลอง WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) ที่พัฒนาโดย USEPA ตั้งแต่ปี ค.ศ.1983 (Wool et al., 2005) แบบจำลอง WASP เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากสมการสมดุลมวลสาร ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K \quad (2.5)$$

โดยที่ C = concentration of the water quality constituent (mg/l)

t = time (days)

U_x, U_y, U_z = longitudinal, lateral and vertical advective velocities (m/day)

E_x, E_y, E_z = = longitudinal, lateral and vertical diffusion coefficients (m^2/day)

S_L = direct and diffuse loading rate (g/m^3-day)

S_B = boundary loading rate (including upstream, downstream, benthic and atmospheric) (g/m^3-day)

S_K = total kinetic transformation rate; positive is source, negative is sink (g/m^3-day)

2.6 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันงานวิจัยหลายงานได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคาดการณ์คุณภาพน้ำได้ค่อนข้างแม่นยำ และถือเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการวางแผนในการจัดการด้านคุณภาพน้ำ ซึ่งในปัจจุบันนอกจากจะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่มีพื้นฐานจากสมการคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากแล้ว ยังได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อให้การจำลองลักษณะการกระจายตัวของมลสารในน้ำใกล้เคียงกับธรรมชาติมากขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะของโปรแกรมสำเร็จรูปนั้นมีให้เลือกใช้หลายแบบด้วยกัน ซึ่งการจะเลือกใช้แบบใดขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของแหล่งน้ำนั้น พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์ และข้อมูลเฉพาะต่างๆ ของแหล่งน้ำ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณภาพน้ำในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ WASP, QUAL2K, MIKE11 และ

WQRRS เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองเหล่านี้ ได้แก่ การศึกษาคุณภาพน้ำและการเกิดยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ในอ่าวแทมปา (Tampa bay) รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา ด้วยแบบจำลอง WASP (Wang et al., 1999) การใช้แบบจำลอง MIKE11 ในการคาดการณ์คุณภาพน้ำแม่น้ำแม่กลองตอนบนตั้งแต่จังหวัดกาญจนบุรี ถึงจังหวัดราชบุรี ประเทศไทย (นฤมล สังขประดิษฐ์, 2541) และการใช้แบบจำลอง QUAL2E ในการวางแผนการจัดการคุณภาพน้ำในแม่น้ำของชุมชนเมืองมาดริด ประเทศสเปน (Cubilo et al., 1992) เป็นต้น

นอกจากการคาดการณ์คุณภาพน้ำแล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถจำลองปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นหากมีการกำหนดเงื่อนไขการจัดการการปล่อยมลพิษ (loading scenario) ในแบบต่างๆ เพื่อดูว่าควรมีการปล่อยมลพิษเท่าใดคุณภาพน้ำจึงไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่ปริมาณมลพิษที่สามารถปล่อยได้โดยไม่ทำให้คุณภาพน้ำต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดก็คือ ค่า TMDL ของแหล่งน้ำนั่นเอง ซึ่งการประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำเป็นแนวทางที่สำคัญแนวทางหนึ่งในการวางแผนจัดการคุณภาพน้ำและการพัฒนาพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยปัจจุบันหน่วยงานในประเทศไทยให้ความสนใจงานวิจัยด้านการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำมากขึ้น

โดยในปี พ.ศ.2545 กรมควบคุมมลพิษได้ทำการสำรวจความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ เพื่อการจัดการมลพิษจากกิจกรรมขนาดเล็กในพื้นที่อนุรักษ์น้ำดิบเพื่อการประปาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ QUAL2E โดยมีลุ่มน้ำท่าจีน และลุ่มน้ำแม่กลองเป็นพื้นที่ศึกษา และทำการประเมินความสามารถในการรองรับความสกปรกในรูปของค่า BOD เท่านั้น โดยในลุ่มน้ำท่าจีนจะทำการประเมินแม่น้ำท่าจีนทั้งสาย ส่วนลุ่มน้ำแม่กลองจะทำการประเมินเฉพาะแม่น้ำแควน้อยทั้งสาย แม่น้ำแควใหญ่ทั้งสาย และแม่น้ำแม่กลองตั้งแต่จุดบรรจบแม่น้ำแควน้อย-แควใหญ่จนถึงเขื่อนแม่กลอง จากการศึกษา พบว่า แม่น้ำท่าจีนมีปริมาณมลพิษที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเกินกว่าความสามารถในการรองรับมลพิษ โดยมีภาระมลพิษสูงถึง 40,578 กิโลกรัมต่อวัน ในขณะที่มีความสามารถในการรองรับมลพิษเพียง 6,271 กิโลกรัมต่อวัน ดังนั้นหากต้องการให้แม่น้ำท่าจีนมีคุณภาพตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 (ค่า BOD ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า DO ไม่ต่ำกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะต้องลดปริมาณมลพิษจากแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (point source) ให้ได้ ร้อยละ 75 ของประสิทธิภาพการบำบัด และลดปริมาณมลพิษจากแหล่งกำเนิดที่ไม่แน่นอน (non point source) ให้ได้ร้อยละ 60 ของประสิทธิภาพการบำบัดควบคู่ไปกับการลดปริมาณน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงและปศุสัตว์ ในส่วนของแม่น้ำแม่กลองจากการทำนายคุณภาพน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแม่น้ำแม่กลองมีความสามารถในการรองรับมลพิษสูงถึง 74,760.5 กิโลกรัมต่อวัน เมื่อกำหนดให้แม่น้ำแม่กลองมีคุณภาพน้ำตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ตามประกาศของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม และเมื่อพิจารณาถึงภาระมลพิษใน

ปัจจุบัน พบว่า มีค่าเท่ากับ 60,808.15 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งทำให้แม่น้ำแม่กลองยังมีความสามารถในการรองรับมลพิษได้เพิ่มอีกประมาณ 13,952.35 กิโลกรัมต่อวัน

นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างของการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษของแม่น้ำสายหลักในประเทศ เช่น การประเมิน TMDL ของค่า BOD ในแม่น้ำยม จังหวัดแพร่ (วริยา มิตตา, 2547) โดยจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า TMDL ของค่า BODในแม่น้ำยม สำหรับการใช้ประโยชน์ในปี พ.ศ.2545 มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 159.41-5,482.41 กิโลกรัมต่อวัน โดย TMDL ของค่า BOD ขึ้นกับปริมาณมลสารที่ไหลลงสู่แม่น้ำ ทั้งมลสารที่มาจากแหล่งกำเนิดที่แน่นอน และแหล่งกำเนิดที่ไม่แน่นอน รวมทั้งอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำ ซึ่งแม่น้ำจะมีความสามารถในการรองรับของเสียได้มากบริเวณต้นน้ำและบริเวณท้ายน้ำ โดยปริมาณมลสารในรูปของสารอินทรีย์มีปริมาณมากที่สุดจากพื้นที่เกษตรกรรม และเมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 พบว่า แม่น้ำยมมี TMDL ของ BOD เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 422.74-15,685.52 กิโลกรัมต่อวัน

ในส่วนของต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา การประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำถือเป็นข้อบังคับที่ประกาศใน Clean Water Act (CWA) โดยทุกรัฐต้องทำการกำหนดแหล่งน้ำที่ต้องประเมิน TMDL และดำเนินการตรวจติดตาม (monitoring) คุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง และทำการรายงานผลต่อองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency; USEPA) โดยการกำหนด scenario สำหรับการประเมิน TMDL นั้น USEPA ได้แนะนำว่า ควรมีการกำหนด scenario เพื่อจำลองกรณีวิกฤตที่อาจเกิดขึ้นกับแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาด้วย เช่น กรณีที่อัตราการไหลของน้ำต่ำที่สุดในรอบปี หรือกรณีที่ระบบบำบัดน้ำเสียขัดข้อง เพื่อให้แน่ใจว่าหากเกิดกรณีวิกฤตแล้ว คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาจะยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ USEPA ยังยอมรับ scenario ที่ให้ผลการจำลองค่าคุณภาพน้ำที่มีช่วง $\pm$ 20% confidence limit ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานอีกด้วย (DNREC, 1998)

อย่างไรก็ดี ในการประเมิน TMDL ของแหล่งน้ำนั้น ควรทำการประเมิน TMDL ทั้งในฤดูน้ำหลาก และฤดูแล้ง เนื่องจากความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำจะมีค่าแตกต่างกันตามปริมาณน้ำ และอัตราการไหลของน้ำในแหล่งน้ำนั้นๆ ดังเช่น ในการประเมิน TMDL ของค่า BOD, TN และ TP ของแม่น้ำแนนติโค้ก (Nanticoke River) ประเทศสหรัฐอเมริกา (Delaware Department of Natural Resources and Environmental Control; DNREC, 1998) โดยในการประเมิน TMDL ครั้งนี้ ได้ทำการจำลองสภาพการไหลของน้ำในแบบต่างๆ กัน เช่น อัตราการไหลปกติ อัตราการไหลต่ำสุดในรอบ 10 ปี อัตราการไหลในฤดูแล้ง และอัตราการไหลในฤดูน้ำหลาก ซึ่งจากผลการศึกษาสรุปได้ว่า อัตราการไหลของน้ำที่ต่างกันมีผลต่อความสามารถในการรองรับมลพิษของแหล่งน้ำ

ตัวอย่างการประเมิน TMDL ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ การใช้แบบจำลอง WASP ประเมิน TMDL ของค่า BOD ในแม่น้ำโอกีชี (Ogeechee river) รัฐจอร์เจีย (USEPA, 2000) โดยทำการประเมิน TMDL ของค่า BOD ที่อัตราการไหลต่ำสุด (critical flow) ซึ่ง TMDL ของค่า BOD ในแม่น้ำโอกีชี ที่ประเมินได้มีค่าเท่ากับ 4,125.6 กิโลกรัมต่อวัน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีต่อ TMDL เช่น ในประเทศเกาหลีใต้ มีการใช้แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เพื่อประเมิน TMDL ของลุ่มน้ำขนาดเล็กที่มีการปลูกข้าว (Kang et al., 2006) ในการศึกษาได้แบ่งพื้นที่ออกเป็น 23 ลุ่มน้ำย่อย และใช้แบบจำลอง SWAT วิเคราะห์ TMDL ของปริมาณตะกอนแขวนลอย (Suspension Solid; SS) ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total Nitrogen; TN) และปริมาณฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus; TP) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำมีปริมาณตะกอนแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนรวม และปริมาณฟอสฟอรัสรวม สูงเกิน TMDL