บทความวิจัย

การศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำและคลองที่ไหลมาบรรจบกัน

ณัฐวีร์ เพ็งพุ่ม สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2564 3001 อีเมล: ratphadu@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.001
รับเมื่อ 18 เมษายน 2561 แก้ไขเมื่อ 4 มิถุนายน 2561 ตอบรับเมื่อ 11 มิถุนายน 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 8 มกราคม 2562
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ปัญหามลพิษเป็นปัญหาที่สำคัญ และส่งผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศ หรือมลพิษทางน้ำ ในกรณีของมลพิษทางน้ำ ถ้าหากน้ำไม่สะอาด อาจส่งผลต่อน้ำสำหรับการบริโภค การอยู่อาศัยของสัตว์น้ำ และการประมง นอกจากนี้ยังส่งผลทางอ้อมโดยส่งกลิ่นเหม็นรบกวนได้ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่ถูกปล่อยลงสู่คลองและไหลต่อไปยังแม่น้ำ ซึ่งถูกจำลองมาจากลักษณะภูมิประเทศจริงในประเทศไทย การวิเคราะห์และคำนวณจากสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) ในงานวิจัยศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วการไหลต่อการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษ ที่ความเร็วการไหลของน้ำในคลองที่มีค่า Reynold Number 8.3×10^4, 1.2×10^5 และ 1.7×10^5 และความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำที่มีค่า Reynold Number 2.15×10^5, 4.3×10^5 และ 8.6×10^5 จากผลการวิจัยพบว่าโดยทั่วไปแล้วความเร็วการไหลในแม่น้ำสูงจะทำให้ความเร็วการไหลในคลองสูงขึ้น และความเร็วการไหลในคลองสูงจะทำให้ความเร็วการไหลในแม่น้ำสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นแล้วในกรณีที่มีความเร็วการไหลสูงจะทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูง แต่สามารถลดความเข้มข้นเฉลี่ยได้รวดเร็วเช่นเดียวกัน ยกเว้นบางกรณีที่ความเร็วการไหลในคลองและแม่น้ำต่ำมากทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงขึ้น และบางค่าความเร็วทำให้เกิดการปะทะกันของน้ำที่จุดบรรจบกันของคลองและแม่น้ำส่งผลให้สารพิษสะสมบริเวณนั้นเป็นปริมาณมากและความเข้มข้นเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้กับแบบจำลองอื่นๆ หรือปัญหาที่คล้ายคลึงกันได้ เพื่อประโยชน์ในการจัดการปัญหาด้านมลพิษ

คำสำคัญ: มลพิษทางน้ำ, การแพร่กระจายความเข้มข้น, การไหลของน้ำในแม่น้ำ, แม่น้ำและคลองที่บรรจบกัน

การอ้างอิงบทความ: ณัฐวีร์ เพ็งพุ่ม สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, "การศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำและคลองที่ไหลมาบรรจบกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, หน้า 70–81, ม.ค.–มี.ค. 2562.

Research Article

Numerical Study of a Combined Fluid Flow and Pollutant Concentration Dispersion in a Confluent River and Canal

Nuttawee Pengpom, Somsak Vongpradubchai and Phadungsak Rattanadecho*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2564 3001, E–mail: ratphadu@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.001
Received 18 April 2018; Revised 4 June 2018; Accepted 11 June 2018; Published online: 8 January 2019
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The problems of air pollution and of water pollution are serious and harmful to human beings and other living organisms as contaminated water and pollution can affect human life, aquatic organisms and fisheries. Besides polluted water has long been recognized as an indirect cause of foul odors. This study investigates concentrations and dispersion of toxic pollutants released into a river and a canal. A model is simulated from the real geography of Thailand. Our study involves analyzing and calculating the continuity equation, momentum equations and species concentration dispersion equation based on the finite element method (FEM). This research focuses on the effects of inlet velocities on the concentration dispersions. The Reynold number of inlet velocities in the canal are 8.3×10^4, 1.2×10^5 and 1.7×10^5, and the Reynold number of inlet velocities in the river are 2.15×10^5, 4.3×10^5 and 8.6×10^5. Generally, the velocity of the canal increases when the inlet velocities of the river increases. Also, river velocity generally increases when the inlet velocities in the canal increase. Therefore, high flow velocity has a major impact on enhanced speed, elevated pollutant concentrations. Meanwhile concentrations of toxic substances can be reduced rapidly. In certain cases, the flow velocities in canals and rivers are very low, resulting in higher average concentrations. Moreover, flow velocities can cause collisions at the confluence, resulting in high concentrations of toxic substances and increased average pollutant concentrations. The research findings should be further developed and applied to other types of models or similar issues for effective pollution control and management.

Keywords: Water Pollution, Concentration Dispersion, River Flow, Confluence of River and Canal

Please cite this article as: N. Pengpom, S. Vongpradubchai, and P. Rattanadecho, "Numerical study of a combined fluid flow and pollutant concentration dispersion in a confluent river and canal," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 70–81, Jan.–Mar. 2019 (in Thai).

1. บทนำ

ปัญหามลพิษเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางน้ำ เพราะถ้าน้ำไม่สะอาดมีสารพิษเจือปน อาจส่งผลต่อน้ำสำหรับการบริโภค การอยู่อาศัยของสัตว์น้ำ และส่งกลิ่นเหม็นรบกวนชีวิตประจำวันของประชาชนได้ สารพิษที่ถูกปล่อยลงแม่น้ำมีหลายสาเหตุ เช่น จากการรั่วของท่อใต้น้ำ น้ำเสียจากโรงงาน การรั่วไหลของน้ำมันจากเรือ และขยะจากแหล่งชุมชน เป็นต้น [1] ซึ่งการควบคุมมลพิษในน้ำได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้ โดยเฉพาะการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับประเทศไทยได้ถูกกำหนดไว้โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิของน้ำทิ้งต้องไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 5.5–9 ค่าบีโอดี (BOD) ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี (COD) ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซัลไฟด์ (Sulfide) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น [2] การกำจัดน้ำเสียหรือสารพิษที่เจือปนในแม่น้ำสามารถทำได้โดยการเจือจางความเข้มข้น หรือคือการเพิ่มปริมาณน้ำที่สะอาดโดยการปล่อยน้ำจากประตูน้ำหรือเขื่อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน

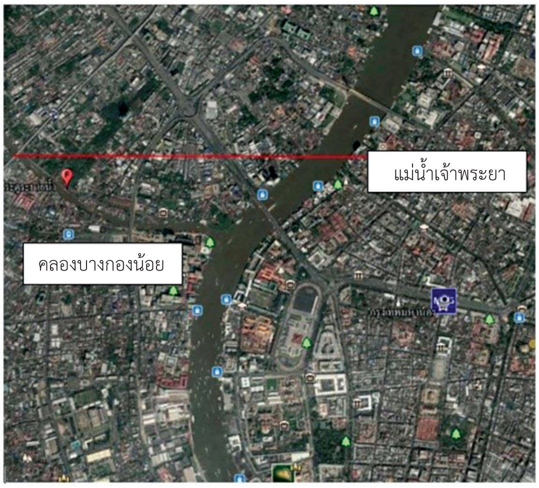
ที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของน้ำในแม่น้ำ การศึกษาการไหลของน้ำในแม่น้ำถูกศึกษาโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ งานวิจัยของ Ambrosi *et al.* [3] ศึกษาการไหลของน้ำในแม่น้ำ Po River อิตาลี โดยการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับผลการวัดของความเร็วการไหล งานวิจัยของ Bradbrook *et al.* [4] ศึกษารูปแบบการไหล โดยเฉพาะจุดที่บรรจบกันของแม่น้ำ Kaskaskia River และ Copper Slough ซึ่งมีการดัดแปลงแบบจำลองแบบต่างๆ กัน โดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม ต่อมาการวิจัยได้ประยุกต์งานวิจัยการไหลของน้ำในแม่น้ำกับปัญหาต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งรวมถึงการศึกษาการแพร่กระจายของสารพิษในแม่น้ำ ซึ่งการวิเคราะห์เกี่ยวกับการแพร่กระจายของสารพิษนี้มีงานวิจัยหลากหลายในรูปแบบของแบบจำลองที่แตกต่างกัน Amorim *et al.* [5] ศึกษาการกระจายตัวความเข้มข้นของสารพิษในแบบจำลองเมืองที่ได้รับอิทธิพลจากต้นไม้ซึ่งถูกพิจารณาเป็นวัสดุพรุน และอิทธิพลของทิศทางการไหลของอากาศในแบบจำลองเมือง 2 แบบ บนพื้นฐานของ Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS) และ URban VEgetation (URVE) งานวิจัยของ Holmberg and Li [6] ศึกษาการแพร่กระจายตัวของสารซึ่งพิจารณาสารเป็นสถานะของแข็งภายในแบบจำลองที่เป็นห้องซึ่งนำแบบจำลอง Eulerian-based Particle มาศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วการไหล และในส่วนของแบบจำลองแม่น้ำ Vasile *et al.* [7], [8] ศึกษาการแพร่กระจายของสารพิษในแม่น้ำ และการเติมสารเพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของสารพิษนั้น ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยของ Gualtieri, Carlo [9] ศึกษาการแพร่กระจายของสารพิษและทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนพื้นฐานของ Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS) งานวิจัยของ Duan [10] จำลองการไหลของของไหลและการแพร่กระจายความเข้มข้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการวิเคราะห์แบบความลึกเฉลี่ย (Depth–averaged Flow) และทดลองเพื่อเปรียบเทียบผล Virgil PETRESCU และ Oreste SUMBASACU [11] ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการกระจายตัวของความเข้มข้น แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลของการวัดจากแม่น้ำจริง ซึ่งแบบจำลองของงานวิจัยได้จำลองมาจากลักษณะแม่น้ำ Upper Olt River งานวิจัยของ Netnapid *et al.* [12] ศึกษาและทำการจัดการคุณภาพน้ำด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอะเรนท์ (Finite Different Method) และคำนวณคุณภาพของน้ำด้วยการใช้สมการการถ่ายเทมวลและแบบจำลองจลนศาสตร์ชีวเคมี เพื่อตรวจสอบความเร็วการไหลของน้ำที่ปล่อยออกมาจากเขื่อนที่เหมาะสมที่สุด

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษในแม่น้ำ ในกรณีสมมติที่น้ำเสียถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่คลองและไหลต่อไปยังแม่น้ำ ซึ่งแบบจำลองถูกจำลองมาจากลักษณะของแม่น้ำและคลองตามลักษณะภูมิประเทศจริงในประเทศไทย เพื่อการศึกษาอิทธิพลของความเร็วของน้ำในแม่น้ำและคลองซึ่งไหลมาบรรจบกันและการสะสมของสารพิษในคลอง สารมลพิษตัวอย่างที่

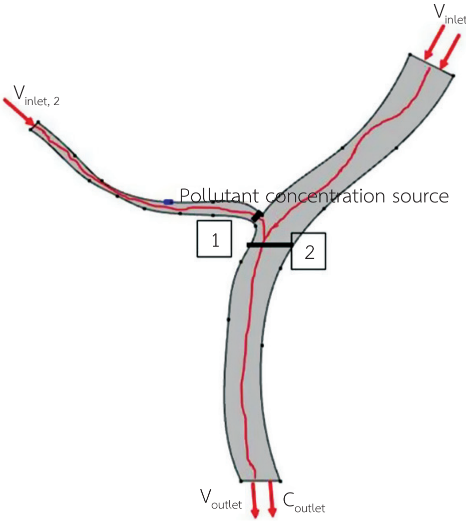
นำมาใช้วิเคราะห์คือไดเมทิลซัลไฟด์ (Dimethyl Sulfide; $(CH_3)_2S$) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารซึ่ง Saltzman และ King [13] ได้ทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในช่วงอุณหภูมิ 5–30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าอยู่ในช่วง $0.8–1.6 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในตัวทำละลายที่สถานะเป็นของเหลวจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที และในการวิจัยนี้ขนาดของแบบจำลองมีขนาดใหญ่ผลของการศึกษาที่ได้จึงอาจสามารถใช้ทำนายการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารอื่นๆ ได้ด้วย วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เป็นการสังเกตถึงความสามารถในการกำจัดสารพิษในคลองซึ่งสามารถส่งผลต่อชีวิตต่อประชาชนในชุมชนริมคลองได้ ที่ความเร็วการไหลของน้ำมีค่าแตกต่างกันทั้งของคลองและแม่น้ำ ด้วยการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คาดว่าผลที่ได้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นๆ หรือสถานการณ์ที่คล้ายคลึงกันได้ เพื่อช่วยวิเคราะห์และหาแนวทางแก้ไขปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจริงในแหล่งน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง แล้วแสดงผลการจำลองออกมาเป็นภาพเคลื่อนไหว และนำข้อมูลหรือค่าต่างๆ ที่ถูกคำนวณออกมาได้มาวิเคราะห์เพื่อหาความเร็วน้ำที่เหมาะสมที่สุดที่จะช่วยระบายสารพิษได้ดีที่สุด

2. วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่เกิดขึ้นในแบบจำลองแม่น้ำและคลองซึ่งมาบรรจบกันที่จุดจุดหนึ่งของแม่น้ำ โดยแบบจำลองเป็นส่วนหนึ่งของแม่น้ำเจ้าพระยาที่เลือกมาศึกษาเฉพาะจุดที่น้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาและคลองบางกอกน้อยไหลมาบรรจบกันเพื่อศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษได้รับอิทธิพลมาจากความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำที่แตกต่างกันและความเร็วการไหลของน้ำในคลองที่แตกต่างกัน แบบจำลองแม่น้ำได้จำลองมาจากลักษณะภูมิประเทศจริงโดยใช้โปรแกรม



รูปที่ 1 ภาพถ่ายดาวเทียวจากโปรแกรม Google Earth



รูปที่ 2 แบบจำลองแม่น้ำและคลอง และเงื่อนไขขอบเขต

Google Earth ช่วยในการสร้างแบบจำลอง ดังรูปที่ 1 และ 2 และสมมติสถานการณ์ว่าเกิดการปล่อยสารพิษลงไปในแม่น้ำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วหยุดปล่อยสารพิษนั้น และสังเกตพฤติกรรมหลังจากนั้นรวมเป็นเวลา 3 วัน

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษประกอบการไหลของของไหลอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งคำนวณจากสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม ที่การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และสมการ

การแพร่กระจายความเข้มข้นของสาร ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารพิษที่แพร่กระจายในน้ำ

การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองได้ทำการเทียบกับผลการศึกษาของ Gualtieri [9] ที่ศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารในของไหลที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งการจำลองอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 สมการที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วของของไหลที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งสมการที่ใช้เพื่อคำนวณและทำนายพฤติกรรม ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการการแพร่กระจายความเข้มข้นของสาร ในแบบจำลอง 2 มิติ ในการพิจารณาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารและการไหลของของไหลมีสมมติฐานว่า

1) สารพิษที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไดเมทิลซัลไฟด์ (Dimethyl Sulfide; $(CH_3)_2S$) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารเท่ากับ 1.0×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที

2) ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีในการวิเคราะห์

3) การไหลของของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

4) ค่าความเข้มข้นของสารที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว

สมการการแพร่กระจายของความเข้มข้น ในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารคงที่และการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา แสดงไว้ในสมการที่ (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{xx}\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_{yy}\frac{\partial C}{\partial y}\right) \quad (1)$$

โดย C คือ ค่าความเข้มข้นของสาร (mol/m^3) และ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสาร (m^2/s)

เงื่อนไขขอบเขตของการศึกษาสำหรับการปล่อยสารพิษซึ่งเป็นการปล่อยด้วยปริมาณคงที่ (C_0) ซึ่งเป็นเหตุการณ์สมมติที่มีการปล่อยน้ำเสียลงสู่คลองบางกอกน้อย ดังรูปที่ 2 และสมการถูกแสดงไว้ในสมการที่ (2)

$$C = C_0 \quad (2)$$

ในส่วนของสมการควบคุมการไหลซึ่งประกอบด้วยสมการความความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม แสดงไว้ในสมการที่ (3)–(5)

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)=0 \quad (3)$$

สมการโมเมนตัม

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y} \quad (5)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3), p คือ ความดันของของไหล (Pa) และ u และ v คือ ความเร็วของของไหลในแกน x และ y ตามลำดับ (m/s)

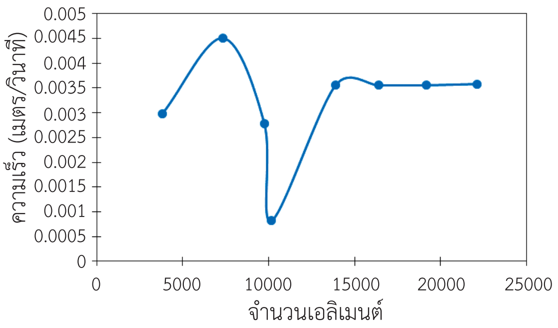
เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการศึกษาการแพร่กระจายของความเข้มข้นซึ่งได้รับอิทธิพลจากความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำ 3 ค่า และความเร็วการไหลของน้ำในคลอง 3 ค่า ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นความเร็วการไหลโดยประมาณตั้งแต่ความเร็วการไหลต่ำจนถึงความเร็วการไหลสูงในแม่น้ำเจ้าพระยา และคำนวณออกมาเป็นค่า Reynold Number สำหรับการไหลแบบเปิด ได้แก่

1) ความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำคงที่ ที่ค่า Reynold Number เท่ากับ 2.15×10^5, 4.3×10^5 และ 8.6×10^5

2) ความเร็วการไหลของน้ำในคลองคงที่ ที่ค่า Reynold Number เท่ากับ 8.3×10^4, 1.2×10^5 และ 1.7×10^5

2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเอลิเมนต์

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษและการไหลของของไหลถูกคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3 ผลการหาความเป็นอิสระของจำนวนเอลิเมนต์

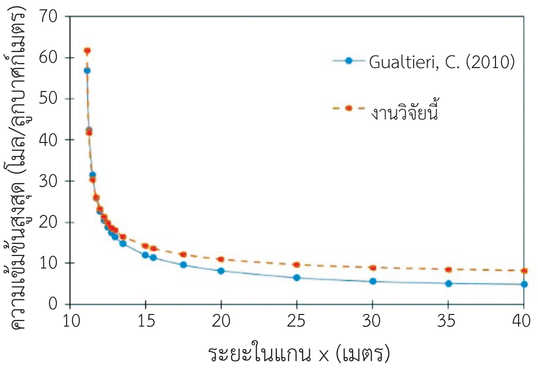
คือ COMSOL Multiphysics ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเอลิเมนต์ พบว่าจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 16,738 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3 ซึ่งทำให้ผลที่ได้เป็นอิสระจากจำนวนของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นลักษณะสามเหลี่ยมที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ที่สุดเท่ากับ 1.23×10^{-5} เมตร และขนาดเล็กสุดเท่ากับ 4.85×10^{-8} เมตร ซึ่งค่าคุณภาพเฉลี่ยของเอลิเมนต์เท่ากับ 0.8598

3. การยืนยันความถูกต้อง

การยืนยันความถูกต้องของเงื่อนไขขอบเขตและสมการของงานวิจัยนี้ได้นำไปเปรียบเทียบผลการศึกษาของ Gualtieri [9] ซึ่งงานวิจัยของ Gualtieri ใช้การจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่แบบจำลองเป็นแบบการไหลปั่นป่วน k–ε ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบโดยการนำค่าความเข้มข้นสูงสุด ณ จุดต่างๆ ในแกน x ที่อยู่ในแนวเส้นกึ่งกลางของแบบจำลองมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้ดังรูปที่ 4 ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้

4. ผลการศึกษา

การศึกษาการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วการไหลของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำ (Re_1) และคลอง (Re_2) พบว่าการแพร่กระจายของสารพิษแพร่กระจายไปตามทิศทางการไหล และไหลอยู่ติดกับริมฝั่งคลองและเกิดการสะสมของสารพิษบริเวณจุดบรรจบกัน



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นสูงสุดกับงานวิจัยของ Gualtieri, Carlo

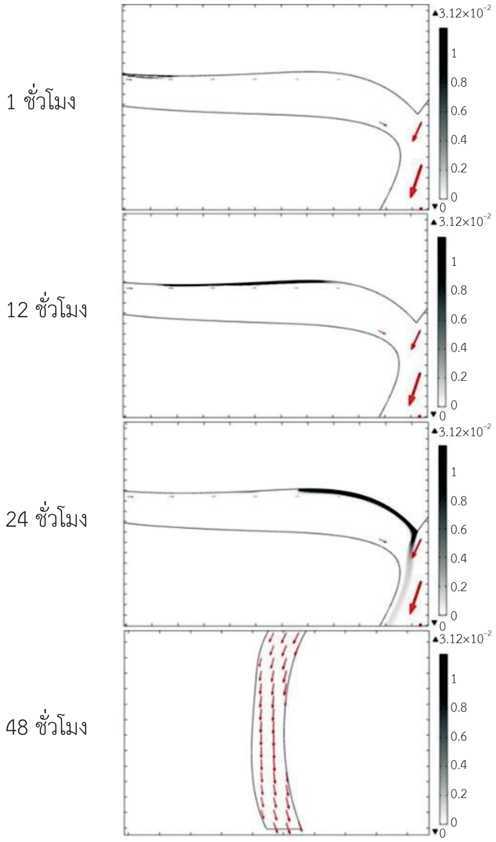
ของแม่น้ำและคลองเป็นปริมาณมาก ซึ่งในส่วนของคลองการแพร่กระจายของสารไปได้ช้า ใช้เวลาประมาณ 1 วัน สารพิษจึงจะเริ่มเข้าสู่แม่น้ำ เพราะสารพิษมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายต่ำ และความเร็วการไหลของน้ำมีความเร็วต่ำ หลังจากนั้นเมื่อสารพิษได้แพร่กระจายเข้าสู่แม่น้ำซึ่งมีความเร็วการไหลสูง ซึ่งสังเกตได้จากเวกเตอร์ความเร็วในแม่น้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าเวกเตอร์ความเร็วในคลอง ทำให้ความเข้มข้นของสารพิษลดลงอย่างรวดเร็วและมีความเข้มข้นของสารพิษภายในแม่น้ำน้อยกว่าในคลอง ดังรูปที่ 5

ผลของความเร็วการไหลของของไหล และการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษ แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

4.1 ความเร็วการไหล

จากการสังเกตความเร็วที่ระนาบเส้นในตำแหน่งที่ 1 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำต่อความเร็วการไหลของน้ำในคลอง พบว่าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วของน้ำในคลองได้ โดยความเร็วทางเข้าของน้ำที่ส่วนตัดของแม่น้ำสูงทำให้ความเร็วเฉลี่ยในคลองสูง

นอกจากนี้จากการสังเกตความเร็วที่ระนาบเส้นในตำแหน่งที่ 2 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำในคลองต่อความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำ พบว่า

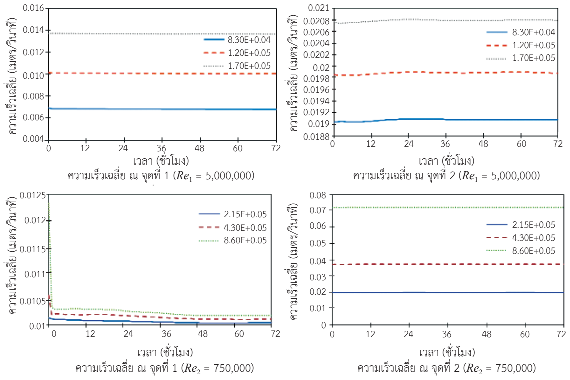


รูปที่ 5 การแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษในช่วงเวลาต่างๆ

ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองสามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลในแม่น้ำได้เช่นกัน โดยความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองสูงทำให้ความเร็วเฉลี่ยในแม่น้ำสูงขึ้นเหมือนกัน แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจากสมการการแพร่กระจายความเข้มข้นของสาร ความเร็วการไหลเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้น ผลของการแพร่กระจายความเข้มข้นจะแสดงในหัวข้อที่ 4.2

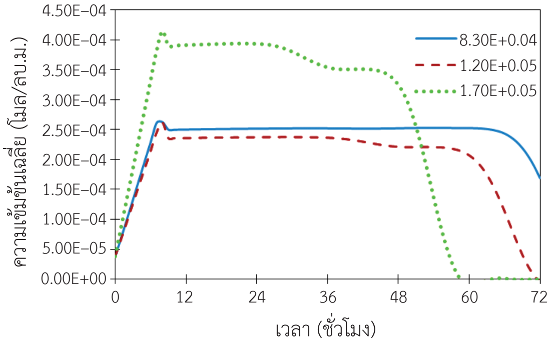
4.2 การแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษ

การศึกษาผลของการแพร่กระจายของความเข้มข้นที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำเท่ากัน แต่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองมีค่าแตกต่างกัน พบว่า ถ้าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองสูงจะส่งผลให้ความเข้มข้นเฉลี่ยเพิ่มสูงในช่วงเวลาแรกที่สารพิษยังคงถูกปล่อยออกมาและในช่วงที่ความเข้มข้นเฉลี่ยคงที่จะมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงที่สุด เพราะว่าความเร็วสูงทำให้เกิดการแพร่กระจายของความเข้มข้นออกมาจากจุดปล่อยสารพิษได้มาก อย่างไรก็ตาม ถ้าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองมีความเร็วสูงจะทำให้ช่วงความเข้มข้นเฉลี่ยคงที่มีช่วงสั้นลง และความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะเมื่อหยุดปล่อยสารพิษแล้ว การไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงกว่าจะทำให้สารพิษเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่า ทำให้สารพิษไม่ตกค้างและใช้เวลาน้อยลงในการระบายสารพิษออก ดังรูปที่ 7–9

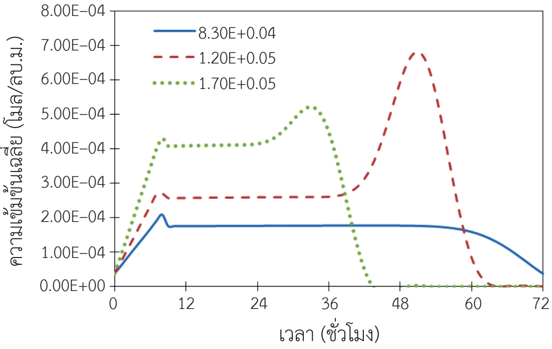


รูปที่ 6 ความเร็วการไหลเฉลี่ย ณ ระนาบเส้นที่ 1 และ 2

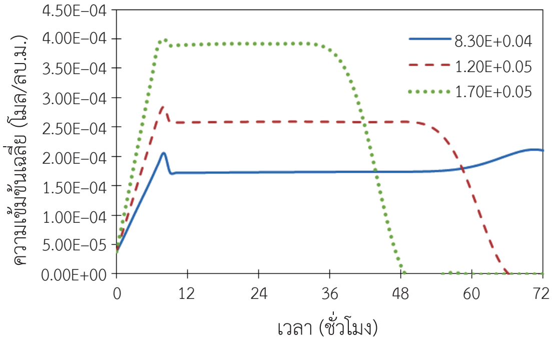
สำหรับในกรณีทั่วไป ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่มีความเร็วการไหลสูงที่สุดทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และลดลงเร็วตามลำดับ แต่สำหรับกรณีความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำต่ำ ($Re_1 = 2.15 \times 10^5$) และความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่มีค่าต่ำ ($Re_2 = 8.3 \times 10^4$ และ 2.15×10^5) ทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษใกล้เคียงกันในช่วงเวลาแรก เพราะความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำต่ำ ($Re_1 = 2.15 \times 10^5$) สามารถส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นในคลองได้น้อย ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ที่ความเร็วของน้ำในแม่น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลของน้ำในคลองได้ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ค่า $Re_2 = 8.3 \times 10^4$ ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษยังคงลดลงช้าที่สุด ส่วนความเร็วของน้ำที่ทางเข้า



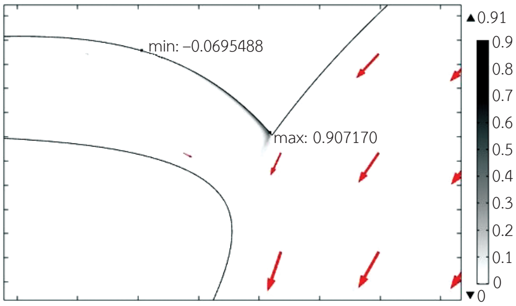
รูปที่ 7 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่ $Re_1 = 2.15 \times 10^5$



รูปที่ 9 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่ $Re_1 = 8.6 \times 10^5$



รูปที่ 8 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่ $Re_1 = 4.3 \times 10^5$

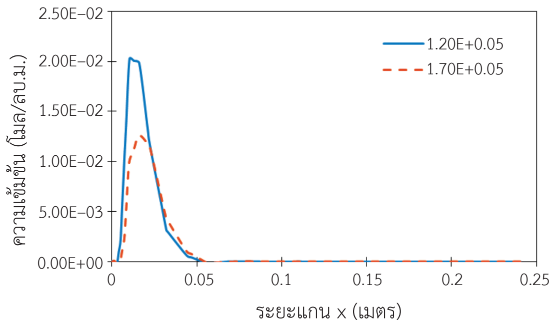


รูปที่ 10 การสะสมของสารพิษที่คลองและแม่น้ำมาบรรจบกันในกรณี $Re_1 = 4.3 \times 10^5$ และ $Re_2 = 8.3 \times 10^5$

ส่วนตัดของคลองที่ $Re_2 = 2.15 \times 10^5$ มีความเร็วมากพอที่จะส่งสารพิษเข้าไปในแม่น้ำได้มากกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยต่ำกว่าในช่วงเวลาหลัง ดังรูปที่ 7

ในส่วนของความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่มีค่า $Re_1 = 4.3 \times 10^5$ พบว่าการไหลของน้ำในคลองที่ $Re_2 = 8.3 \times 10^4$ มีความเร็วการไหลที่ต่ำ ซึ่งปกติจะทำให้การระบายสารพิษออกเป็นไปได้ช้า และเมื่อได้รับอิทธิพลจากความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่ $Re_1 = 4.3 \times 10^5$ ซึ่งเป็นความเร็วที่สามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลในคลองได้เล็กน้อย และไม่มากพอที่จะช่วยระบายสารพิษในคลองได้ในปริมาณมากเท่ากับความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดแม่น้ำที่ $Re_1 = 8.6 \times 10^5$ ทำให้ความเข้มข้นของสารพิษเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 8 และจากรูปที่ 10 สารพิษถูกสะสมเป็นปริมาณมากบริเวณที่การไหลของน้ำในคลองและแม่น้ำมาบรรจบกัน

ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่มีค่า $Re_1 = 8.6 \times 10^5$ ทำให้มีความเร็วการไหลในแม่น้ำมาก ทำให้ช่วยดึงสารพิษออกจากคลองเข้าสู่แม่น้ำได้มากขึ้น และใช้เวลาน้อยลงในการลดความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษ ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่มีค่า $Re_2 = 8.3 \times 10^4$ ซึ่งเป็นความเร็วที่ต่ำที่สุด ความเข้มข้นของสารพิษถูกระบายออกไปได้ช้า แต่ไม่เกิดการสะสมของสารพิษเป็นปริมาณมากในบริเวณที่คลองกับแม่น้ำมาบรรจบกัน และถูกความเร็วจากแม่น้ำซึ่งมีความเร็วมากกว่าช่วยระบายสารพิษออกจากคลอง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟความเข้มข้นเฉลี่ยมีความคงที่มากที่สุด ไม่มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นหลังจากหยุดปล่อยสารพิษแล้ว ดังรูปที่ 9

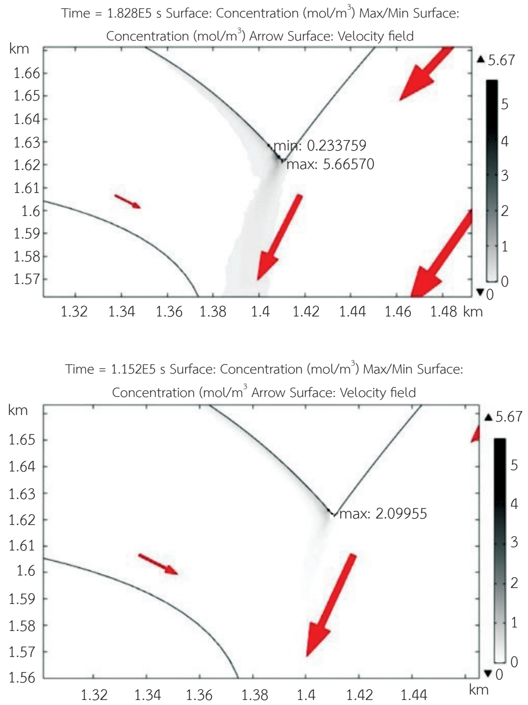


รูปที่ 11 ความเข้มข้นของสารพิษที่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำ $Re_1 = 8.6 \times 10^5$ ณ จุดวัดที่ 2

แต่ที่ $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ ความเร็วการไหลมีความเร็วมากพอที่จะทำให้น้ำจากคลองและแม่น้ำเกิดการปะทะกัน ส่งผลทำให้สารพิษสะสมบริเวณที่จุดบรรจบกันของแม่น้ำและคลอง ความเข้มข้นเฉลี่ยจึงเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับที่ค่า $Re_2 = 1.7 \times 10^5$ ความเร็วการไหลมีความเร็วมากพอจึงทำให้น้ำจากคลองและแม่น้ำเกิดการปะทะได้เช่นกัน แต่ความเร็วของน้ำในคลองของกรณี $Re_2 = 1.7 \times 10^5$ มีค่าสูงกว่า สังเกตได้จากเวกเตอร์ความเร็วการไหลทั้งในคลองและแม่น้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังรูปที่ 12 จึงสามารถส่งสารพิษเข้าสู่แม่น้ำได้มากกว่ากรณี $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษจึงลดลงได้รวดเร็วกว่า ดังรูปที่ 9

จากการเปรียบเทียบ $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ และ $Re_2 = 1.7 \times 10^5$ ซึ่งที่ $Re_2 = 1.7 \times 10^5$ การกระจายของสารพิษจะกระจายออกไปได้ไกลเข้าสู่แม่น้ำได้รวดเร็ว และมีความต่อเนื่องในการระบายสารพิษมากกว่า ซึ่งสังเกตได้จากค่าความเข้มข้นเฉลี่ยจากจุดวัดที่ 2 ซึ่งเป็นจุดที่ใช้วัดความเข้มข้นในแม่น้ำที่ได้รับสารพิษจากคลอง แสดงในรูปที่ 11 พบว่ามีค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 12 พบว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดที่จุดบรรจบของแม่น้ำและคลองในกรณี $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ มีค่าสูงกว่า เพราะฉะนั้นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดในกรณี $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ จึงสูงกว่า

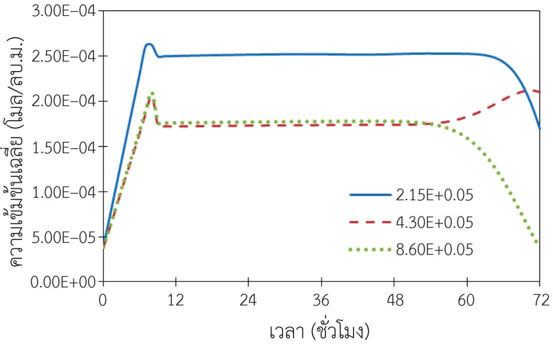
การศึกษาผลของการแพร่กระจายของความเข้มข้นที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองเท่ากัน แต่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำแตกต่างกัน



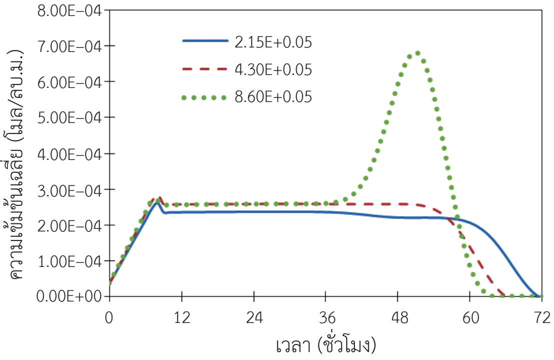
รูปที่ 12 เปรียบเทียบการแพร่กระจายความเข้มข้น ณ เวลาที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด ที่ $Re_1 = 8.6 \times 10^5$ ระหว่าง $Re_2 = 1.2 \times 10^5$ (บน) และ 1.7×10^5 (ล่าง)

พบว่าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษได้น้อยกว่าผลกระทบของความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลอง ทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน และโดยทั่วไป ที่ $Re_1 = 8.6 \times 10^5$ ซึ่งเป็นความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำที่สูงที่สุด ทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุด และสามารถลดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยได้รวดเร็วที่สุดด้วย เพราะฉะนั้นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นและสามารถลดลงได้รวดเร็วขึ้น เมื่อความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 13–15

แต่ในกรณีที่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองต่ำ ($Re_2 = 8.3 \times 10^4$) และความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำต่ำด้วย ($Re_1 = 1.2 \times 10^5$) ความสามารถในการระบายสารพิษออกทำได้ช้ามากทำให้มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูง และที่ $Re_1 = 4.3 \times 10^5$ มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย



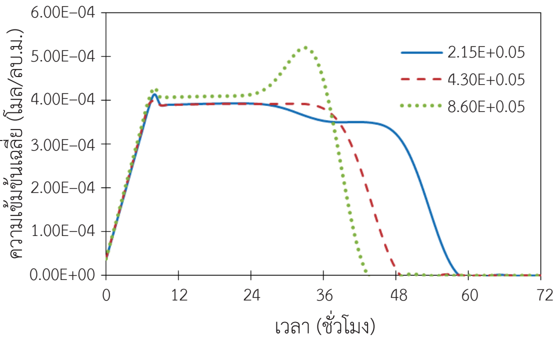
รูปที่ 13 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่ $Re_2 = 8.3 \times 10^4$



รูปที่ 14 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่ $Re_2 = 1.2 \times 10^5$

สูงขึ้นมาในช่วงเวลาหลัง เป็นไปตามดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ในส่วนของการศึกษาผลของการแพร่กระจายของความเข้มข้นที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำเท่ากัน และความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองแตกต่างกัน

เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปแล้ว ถ้าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำและคลองสูงจะทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษลดลงได้เร็วที่สุด ถึงแม้ว่าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำสูงจะทำให้เกิดการสะสมของสารพิษที่จุดบรรจบกันของแม่น้ำและคลองมาก แต่ยังคงสามารถช่วยระบายสารพิษได้ดีที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติการเพิ่มปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากประตูน้ำหรือเขื่อนจะช่วยให้ความเข้มข้นของสารพิษลดลงได้เร็วขึ้น



รูปที่ 15 ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองที่ $Re_2 = 1.7 \times 10^5$

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลของน้ำในคลองและแม่น้ำที่มีความเร็วแตกต่างกันต่อการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษ พบว่าความเร็วของน้ำในคลองสามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วของน้ำในแม่น้ำได้ โดยความเร็วของน้ำในแม่น้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองมากขึ้น และความเร็วของน้ำในแม่น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อความเร็วการไหลของน้ำในคลองได้เช่นกัน โดยความเร็วการไหลในคลองเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำมากขึ้น ซึ่งความเร็วการไหลนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถส่งผลต่อการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษ

ในกรณีความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำเท่ากัน โดยทั่วไปถ้าความเร็วคลองมากขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น แต่สามารถลดความเข้มข้นเฉลี่ยลงได้รวดเร็วเช่นกัน ยกเว้นบางกรณีที่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำต่ำ ทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของกรณีความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองต่ำมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ความเร็วการไหลของน้ำในคลองต่ำที่สุดยังคงใช้เวลาในการลดความเข้มข้นเฉลี่ยลงช้าที่สุด และในบางกรณีที่ความเร็วแม่น้ำมีค่าที่มาก และความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองมีค่ามากด้วย ทำให้เกิดการปะทะกันของน้ำและเกิดการสะสมของสารพิษในคลองมากขึ้น โดยเฉพาะจุดที่คลองและแม่น้ำมาบรรจบกัน แต่ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษ

ยังคงลดลงเร็วที่สุด ถ้าความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองสูงที่สุด

ในกรณีความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองเท่ากัน พบว่าโดยทั่วไปถ้าค่าความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำมากขึ้นทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงขึ้น แต่สามารถลดความเข้มข้นเฉลี่ยของสารพิษได้เร็วขึ้นเช่นกัน ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของแม่น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษได้น้อยกว่าผลกระทบของความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยกเว้นสำหรับกรณีที่ความเร็วของน้ำที่ทางเข้าส่วนตัดของคลองและแม่น้ำต่ำ ซึ่งกรณีนี้ทำให้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูง และยังลดความเข้มข้นของสารพิษได้ช้า เพราะการระบายสารพิษออกเป็นไปได้ช้าเนื่องจากความเร็วการไหลของน้ำต่ำมาก

เพราะฉะนั้นการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารพิษแปรผันตรงกับความเร็วการไหลของของไหล แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่สามารถส่งผลกระทบได้ เช่น ลักษณะของแบบจำลองทิศทางการไหลของของไหล เป็นต้น ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน หรือปัญหาอื่นๆ ที่พิจารณาถึงการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารกับการไหลของของไหลได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัย และได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (No. RTA5980009)

เอกสารอ้างอิง

[1] Project Oceanography. (2000). *Neighborhood Water Quality: Pollution and Water Quality* [Online]. Available: https://www.marine.usf.edu/pjocean/packets/f00/nwq2.pdf

[2] Ministry of Natural Resources and Environment. (2016, March). PCD: Water Quality Stansards. Pollution Control Department, Thailand [Online]. Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html.

[3] D. Ambrosi, S. Corti, V. Pennati, and F. Saleri, "Numerical simulation of unsteady flow at Po river delta," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, no. 12, pp. 735–743, 1996.

[4] K. F. Bradbrook, S. N. Lane, and K. S. Richards, "Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences," *Water resources research*, vol. 36, no. 9, pp. 2731–2746, 2000.

[5] J.H. Amorim, V. Rodrigues, R. Tavares, J. Valente, and C. Borrego, "CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion," *Science of the Total Environment*, vol. 461–462, pp. 541–551, 2013.

[6] S. Holmberg and Y. Li, "Modelling of the indoor environment–particle dispersion and deposition," *Indoor Air*, vol. 8, no. 2, pp. 113–122, 1998.

[7] V. M. Cristea, E. D. Bâgiu, and P. Ş. Agachi, "Simulation and control of pollutant propagation in Someş river using COMSOL multiphysics," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 985–990, 2010.

[8] V. M. Cristea, "Counteracting the accidental pollutant propagation in a section of the river Someş by automatic control," *Journal of Environmental Management*, vol. 128, pp. 828–836, 2013.

[9] C. Gualtieri, "RANS-based simulation of transverse turbulent mixing in a 2D geometry," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 10, no. 1–2, pp. 137–156, 2010.

[10] J. G. Duan, "Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels," *Journal

of Hydraulic Engineering, vol. 130, no. 10, pp. 964–976, 2004.

[11] V. Petrescu and O. Sumbasacu, "Comparison between numerical simulation and measurements of the pollutant dispersion in a river, Case study," *UPB Sci. Bull.*, vol. 72, no. 3, pp. 157–164, 2010.

[12] N. Tantemsapya, "Modeling approach to water quality management in the lower Pong river, Thailand," *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 10, pp. 1199–1206, 2017.

[13] E. S. Saltzman, D. B. King, K. Holmen, and C. Leck, "Experimental determination of the diffusion coefficient of dimethylsulfide in water," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 98, no. C9, pp. 16481–16486, 1993.