

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ

น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะมีธาตุอาหารเจือปนอยู่เสมอซึ่งธาตุอาหารได้มาจากการละลายที่มีประโยชน์ เพราะเป็นปัจจัยเบื้องต้นอันหนึ่งที่ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ และพวกแพลงก์ตอน อันเป็นผู้ผลิตเบื้องต้น (primary producer) ในห่วงโซ่อาหาร ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชน้ำมีหลายชนิดด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจน ฟอสเฟต เป็นต้น (Fogg, 1971) แต่หากในแหล่งน้ำมีปริมาณธาตุอาหารพืชมากเกินไปส่งผลให้เกิดพืชน้ำเป็นจำนวนมากก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและเป็นที่รำคาญแก่มนุษย์เรียกว่า eutrophication (Committee on Water Quality Criteria, 1972) ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทำให้เกิดการเจริญเติบโตเกินขีดของสาหร่าย (Algae bloom) ซึ่งเป็นปัญหาต่อการสัญจรทางน้ำและการนำน้ำไปใช้ เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานทำปุ๋ยและผงซักฟอก (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539) ซึ่งสอดคล้องกับ (Thomas et al., 1998) และ (Pavoni, 1977) ที่กล่าวว่า การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายทำให้เกิดอันตรายต่อ สัตว์น้ำ มีผลต่อทัศนียภาพของแหล่งน้ำ และเมื่อสาหร่ายเหล่านั้นตายลงไปเกิดการเน่าเปื่อย จะมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ทำให้น้ำเน่าเสียได้ ซึ่งธาตุอาหารพืชที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ eutrophication นี้ได้แก่ ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปฟอสเฟตและไนเตรท โดย (Holland, M.M., Rast, & Ryding, 1990) ได้ให้ความหมายของ eutrophication ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารพืชอย่างมากเกินไปของน้ำ แสดงให้เห็นถึงสิ่งไม่พึงปรารถนาในการเปลี่ยนแปลงเพราะเป็นสิ่งก่อให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นของสาหร่ายและพืชน้ำ และเป็นปัญหาการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำทั้งรสและกลิ่น ทั้งยังเป็นอันตรายต่อปลาอีกด้วย นอกจากนี้ (Straskraba, 1979) กล่าวถึงกระบวนการ eutrophication ที่ส่งผลเสียต่อแหล่งน้ำดังต่อไปนี้

1. ก่อให้เกิดความรำคาญแก่กิจกรรมมนุษย์ เนื่องจากจะเกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายชนิดที่ไม่พึงปรารถนาและไม่สวยงามในแหล่งน้ำ ซึ่งสาหร่ายดังกล่าวจะไปขัดขวางการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ลดลง อีกทั้งทำให้ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส และฟอสฟอรัส เพิ่มขึ้น
2. จากการผลิตสารบางอย่างของสาหร่ายแอกติโนมัซีส และแบคทีเรีย ทำให้แหล่งน้ำมีสีและรสอันไม่พึงปรารถนา นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มการคายระเหยและการสูญเสียน้ำ
3. เป็นการเพิ่มโคลนตมในอ่างเก็บน้ำ ลดปริมาณการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ

2.1.1 ไนโตรเจน (nitrogen)

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพ พืช และสัตว์ เนื่องจากมีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำมาก และยังเป็นส่วนประกอบสำคัญในด้านการสังเคราะห์ และการคงรูปของโปรตีน (สุทธิรัตน์ พลฤษนันต์, 2549) สารประกอบไนโตรเจนจึงเป็นสิ่งจำกัดอย่างหนึ่งของความอุดมสมบูรณ์ในแหล่งน้ำ โดยสามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย ไนเตรทและไนไตรท์ (สิทธิชัย ดันธนะสฤทธิ, 2549ก)

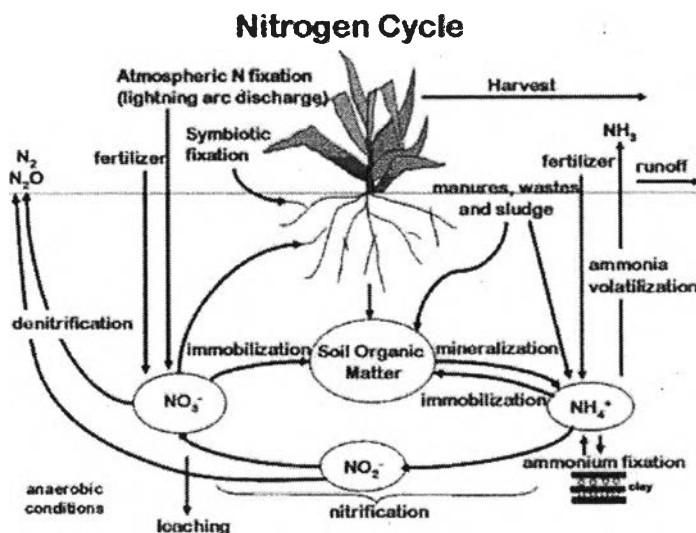
แหล่งที่มาของไนโตรเจนอาจได้มาจากภายในแหล่งน้ำเองซึ่งเกิดจากขบวนการตรึงไนโตรเจนของจุลินทรีย์ และสาหร่ายบางชนิด การสูญเสียสารประกอบไนโตรเจนจากแหล่งน้ำนั้น เนื่องจากไนโตรเจนบางส่วนถูกใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงของพืช และเน่าสลายของอินทรีย์วัตถุ และบางส่วนสูญเสียไปกับน้ำที่ไหลออกโดยรวมกับธาตุอื่นๆ เป็นตะกอน (ณัฐกานต์ พันชนะ, 2537) ไนโตรเจนมีแหล่งที่มาทั้งจากธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งแหล่งที่มาของไนโตรเจนที่มาจากธรรมชาติ (ประมาณ พรหมสุทธิรักษ์, 2531) ได้แก่

- 1) บรรยากาศ (atmosphere) เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าได้ในไตรทไนโตรเจน และเกิดจากการการสลายตัวของวัตถุสารบนพื้นโลก การระเบิดของภูเขาไฟ
- 2) จุลินทรีย์หรือสาหร่ายขนาดเล็ก (microorganism) ที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้และนำไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมเพื่อการเจริญเติบโต
- 3) น้ำใต้ดินและน้ำพุ (ground and spring water) สำหรับในแหล่งน้ำสารประกอบไนโตรเจนจะได้จากการตกตะกอนของน้ำผิวดินที่ไหลเข้ามา ซึ่งจะนำพาสารประกอบไนโตรเจนมาด้วย

แหล่งที่มาของไนโตรเจนจากกิจกรรมของมนุษย์ (พิทักษ์ วงษ์ชาลี, 2534) ได้แก่

- 1) ชุมชน ส่วนใหญ่ไนโตรเจนจากชุมชนที่พบมักอยู่ในรูปของแอมโมเนีย มีไนเตรท ไนโตรเจนบ่าง และเกือบจะไม่มีไนไตรท์อยู่เลย แต่อย่างไรก็ตามแอมโมเนีย ไนโตรเจนและอินทรีย์สารไนโตรเจน ต่อมาสามารถถูกออกซิไดส์ให้อยู่ในรูปไนไตรท์ และไนเตรท นอกจากนี้ไนโตรเจนที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในเขตชุมชนเมื่อนั้นมาจากสิ่งปฏิกูลของคนและของเสีย จากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับในเขตชนบท มาจากทุ่งนา ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ การเนาเปื้อยของซากพืช อินทรีย์สารในดิน (Symons, 1970)

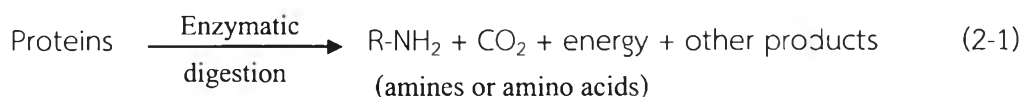
- 2) ปุ๋ยที่ใส่ลงในดิน เช่นปุ๋ยวิทยาศาสตร์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากก๊าซไนโตรเจนในอากาศ นอกจากนี้ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยอินทรีย์ไนโตรเจนอื่นๆ ที่เกษตรกรนิยมใส่ในแปลงเกษตรก็เป็นแหล่งที่มาของไนโตรเจนเช่นกัน



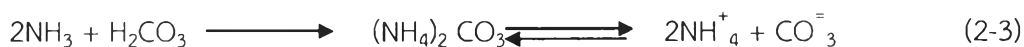
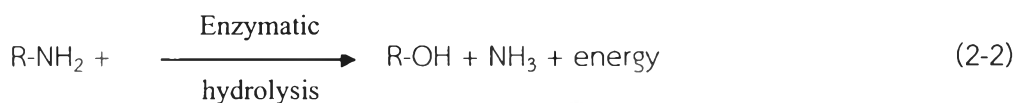
รูปที่ 2-1 วัฏจักรไนโตรเจน

ดัดแปลงจาก (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005a)

เมื่อสารประกอบไนโตรเจนจากแหล่งต่างๆได้เข้ามาอยู่ในระบบนิเวศจะมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 วัฏจักรไนโตรเจน เริ่มจากการตรึงก๊าซไนโตรเจนจากอากาศโดย nitrogen – fixing bacteria และสำหรับบางชนิด ซึ่งจะนำมาใช้สร้างกรดอะมิโนและโปรตีน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ aminization ดังสมการ



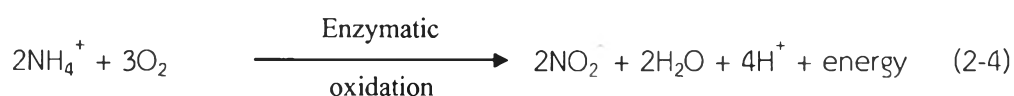
เมื่อพืชและจุลินทรีย์เหล่านั้นตายลง โปรตีนของมันจะถูกแบคทีเรียและราเข้าย่อยสลายกลายเป็นกรดอะมิโน ในที่สุด อะมิโนกรุปจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมไอออนในดิน โดยกระบวนการ ammonification ดังสมการ



กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) มักเกิดได้ดีในสภาพที่ดินมีอากาศถ่ายเทดี แต่กระบวนการนี้อาจจะดำเนินไปได้บ้าง แม้ว่าสภาพของดินไม่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากว่ายังมีจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้บางชนิดที่สามารถจะทำงานได้ ซึ่งแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงไปได้ใน 4 ทาง คือ 1) จุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ 2) พืชชั้นสูง (higher plant) ที่ยังเป็นต้นกล้า เช่น ต้นกล้าข้าว ซึ่ง

เจริญเติบโตได้ดีเมื่อได้รับไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย 3) ถูกตรึงอยู่ระหว่างผลึก (crystal lattice) ของอนุภาคแร่ดินเหนียว 4) ถูกออกซิไดส์เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน

กระบวนการ nitrification ซึ่งเกิดขึ้นโดย nitrifying bacteria เป็นแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน กระบวนการนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน กล่าวคือ NH_3 หรือ NH_4^+ จะถูกออกซิไดส์ให้เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) ก่อนโดยแบคทีเรียพวก nitrosomonas และ nitrosococcus ดังสมการ

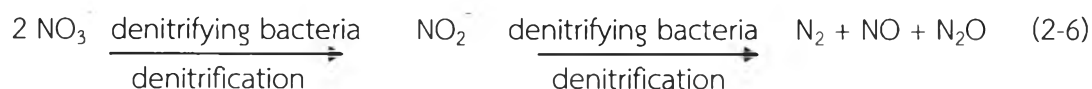


ต่อมาไนไตรท์ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์อีกครั้งให้เป็นไนเตรทโดยแบคทีเรียพวก

Nitrobacter ดังสมการ



หลังจากที่บางส่วนของพืชถูกสัตว์กินเป็นอาหารและเมื่อสัตว์หรือพืชเหล่านั้นตายลงไนโตรเจนจะกลับสู่วัฏจักรอีก ซึ่งสารประกอบในดินนี้จะสามารถกลับสู่บรรยากาศได้โดยกระบวนการ denitrification ดังสมการต่อไปนี้



นอกจากนี้ไนเตรทที่มีในแหล่งน้ำมาจากบริเวณพื้นที่ชนบท ได้แก่ ฟุงนา ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ปุ๋ยที่ใช้เพื่อการเกษตรกรรม น้ำฝน การเน่าเปื่อยของซากพืช อินทรีย์สารในดิน และการใช้ปุ๋ย โดยเฉพาะน้ำไหลบ่า (runoff) มีผลต่อการนำพาไนเตรทและ สารประกอบไนโตรเจนลงสู่แหล่งน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนักเบาของฝน โครงสร้างของดิน ความลาดชัน ความชื้นในดิน ลักษณะกายภาพของผิวดินและการปฏิบัติทางด้านอนุรักษ์ดินและน้ำ การปลูกพืชคลุมดิน ซึ่งมีผลต่อการซึมของน้ำลงสู่ดิน ถ้าน้ำซึมได้น้อยจะทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินมากและชะล้างธาตุอาหารต่างๆลงสู่แหล่งน้ำได้ ในขณะเดียวกันหากมีการสูญเสียธาตุอาหารพืช หรือดินถูกกัดเซาะพังทลาย ซึ่งมักเกิดกับดินที่ไม่มีพืชหรือสิ่งปกคลุม พื้นที่ลาดชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝนที่มีน้ำระบายในปริมาณสูงปริมาณไนเตรทนี้ก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (Hensler & Attoe, 1970)

ไนเตรทปริมาณ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เกิดยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำ และคุณภาพน้ำอุปโภคเมื่อมีการนำแหล่งน้ำนั้นมาใช้ประโยชน์ รวมทั้งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Metcalf and Eddy, 1991) ส่วนในน้ำเสียจะมีปริมาณไนเตรทมากเป็นพิเศษ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระบวนการเพิ่มของประชากรพืชน้ำอย่างรวดเร็วและทำให้

สัตว์น้ำได้รับผลกระทบจากการที่ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง แหล่งน้ำผิวดินจะพบไนเตรทในปริมาณน้อยซึ่งมักมีน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างสูงไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในน้ำใต้ดินอาจมีไนเตรทสูงตั้งแต่ 0 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศด้วย (สิทธิชัย ตันธนะสฤทธ์, 2549ข) ซึ่งค่าความเข้มข้นของไนเตรทในแหล่งน้ำผิวดินจาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2543) ได้กำหนดไว้ว่าปริมาณไนเตรทไนโตรเจนควรมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยในมนุษย์ หากมนุษย์บริโภคน้ำที่มีระดับการปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งน้ำสูงกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสาเหตุของการเกิดโรคตัวเขียวในเด็กที่มีอายุต่ำกว่า 6 เดือน ซึ่งทางการแพทย์เรียกว่า Methemoglobinemia (Infant Cyanosis หรือ Blue-Baby Syndrome) เนื่องจากไนเตรทจะไปทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน เกิดเป็นสาร Methemoglobin ที่เป็นตัวยับยั้งการรับส่งออกซิเจนในเลือด ทำให้เกิดอาการตัวเขียวและถึงตายได้ (สุรัชดา ไชยชนะ, 2544) หากผู้ป่วยเป็นโรคหัวใจหรือโรคปอด บริโภคน้ำปนเปื้อนไนเตรท อาจทำให้ได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าคนทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่าไนเตรทเมื่อทำปฏิกิริยากับ Amines จะเกิด Nitrosamines ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง หากบริโภคน้ำที่มีระดับการปนเปื้อนไนเตรทสูงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งได้ (Stensel & Horne, 2000) นอกจากนี้มีรายงานว่าไนเตรทที่ความเข้มข้น 69 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ปลาติดโรคง่ายขึ้นและที่ระดับความเข้มข้น 181 มิลลิกรัมต่อลิตร จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อปลาถึงตายได้ (Abdul, Hvitved, Vollertsen, & Ujang, 2002)

2.1.2 ฟอสฟอรัส (phosphorus)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พบได้ทั้งในดินและน้ำ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ หิน แร่ และปะปนมากับหยาดน้ำฝนแต่ก็มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับฟอสฟอรัสที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดมลพิษอื่นๆ (ณัฐกานต์ พันชนะ, 2537) รูปของฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับระบบนิเวศของแหล่งน้ำได้แก่ ฟอสเฟต สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ และสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่เป็นอนุภาค ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของฟอสเฟตจะถูกนำไปใช้ได้ดีที่สุด เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ดี และมีจำนวนมากกว่าฟอสเฟตอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ดังนั้นอาจใช้ค่าของฟอสเฟตแทนค่าผลรวมของฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำ (total soluble phosphorus) ทั้งหมดได้

สารประกอบของฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำมีอยู่ 2 รูปแบบ (ประเทือง เชาวน์วันกลาง, 2534)

1) สารประกอบพวกอนินทรีย์ฟอสเฟต (inorganic phosphate) พบทั่วไปในแหล่งน้ำ ซึ่งได้รับมาจากน้ำทิ้งและกิจกรรมต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น

1.1) สารประกอบออร์โธฟอสเฟต (orthophosphates) สารประกอบนี้ละลายน้ำได้ดี และแพลงก์ตอนพืชยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

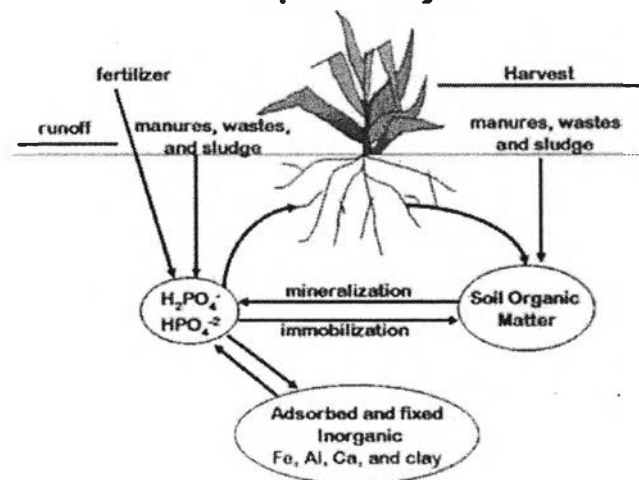
1.2) สารประกอบโพลีฟอสเฟต (polyphosphates) พบในน้ำทิ้งจากบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและชุมชนในเขตเมือง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของผงซักฟอก (detergent) แต่เนื่องจากสาร

พวกนี้เป็น dehydrated phosphate จึงถูกไฮโดรไลสในน้ำกลับเป็น orthophosphates ตามเดิม และถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประกอบกับ ค่า pH ลดลงก็จะสามารถเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวให้เร็วขึ้น

2) สารประกอบพวกอินทรีย์ฟอสเฟต (organic phosphates) คือสารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ เป็นฟอสเฟตที่รวมอยู่กับสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น nucleic acid, phospholipids, sugar phosphate รวมทั้งฟอสฟอรัสที่อยู่ในซากพืชซากสัตว์

ในแหล่งน้ำที่มีปริมาณฟอสเฟตน้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จัดว่าเป็นแหล่งน้ำที่มีธาตุอาหารน้อย (oligotrophic lake) และถ้าแหล่งน้ำใดมีปริมาณฟอสเฟตมากกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จัดว่าเป็นแหล่งน้ำที่มีธาตุอาหารมาก (eutrophic lake) กล่าวคือมีฟอสฟอรัสอยู่ระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pavoni, 1977) ในแหล่งน้ำที่เกิดมลภาวะยูโทรฟิเคชันจะมีฟอสเฟตอยู่ถึง 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากบ้านเรือนมีฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 9-10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้การเจือปนของธาตุอาหารพืชปริมาณที่มากเกินไปในแหล่งน้ำอาจมีผลต่อสัตว์และมนุษย์ได้ โดยทางห่วงโซ่อาหารและโดยการที่มนุษย์และสัตว์ดื่มน้ำที่มีธาตุอาหารพืชเจือปนอยู่ (Fair, Geyer, & Odum, 1971) อีกทั้ง (Placido D. La Valle, 1975) ได้รายงานว่ามีฟอสเฟต 1 ปอนด์ ทำให้พวกสาหร่ายสีเขียวเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นถึง 700 ปอนด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเมื่อสาหร่ายเหล่านี้ตายลง และเป็นตัวทำให้แหล่งน้ำสกปรกเน่าเสียอีกด้วย

Phosphorus Cycle



รูปที่ 2-2 วัฏจักรฟอสฟอรัส

ดัดแปลงจาก (Neitsch et al., 2005a)

วัฏจักรของฟอสฟอรัส ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ฟอสฟอรัสตามธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอสเฟตไอออน โดยรูปที่มีมากที่สุดคือ orthophosphate ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ ในสภาพที่ดินเป็นกรด และอยู่ในรูปของ HPO_4^{2-} ในสภาพที่ดินเป็นด่าง เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตลงไปในดินจะมีการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดิน ใน 2 กระบวนการ ได้แก่ ฟอสเฟตจะถูกตรึงทันทีด้วยวิธี polar

adsorption โดยกระบวนการเปลี่ยนรูป P อินทรีย์ให้เป็น P อนินทรีย์ (mineralization) และเปลี่ยนรูป P อนินทรีย์ให้เป็น P อินทรีย์ (immobilization) เกิดขึ้นพร้อมๆกัน ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการ mineralization ของอินทรีย์ P ในดินได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศ pH ของดิน การไถพรวน และการใส่ปุ๋ย ซึ่งการที่ดินอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกันจะช่วยกระตุ้นการ mineralization ของฟอสฟอรัส อีกกระบวนการหนึ่งคือการตกตะกอนในดินเป็นสารฟอสเฟตที่ละลายได้ยาก ซึ่งจะพบว่าอลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียมฟอสเฟต เป็นสารประกอบหลักของฟอสเฟตที่ตกตะกอนในดิน สารประกอบเหล่านี้มีการละลายน้ำต่ำ เมื่อละลายแล้วก็จะเป็นประโยชน์ต่อพืชต่อไป โดยสารประกอบฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่กับตะกอนเป็นผลมาจากการสลายตัวของแร่แอปพาไทต์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาปุ๋ยเคมี P ในดิน (ยงยุทธ โอสภสภมา, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชัยสิทธิ์ ทองจู, 2541) ทั้งนี้เมื่อเกิดการชะล้าง (leaching) จากน้ำฝนและการพังทลาย (erosion) ของดินหรือการใส่ปุ๋ยที่ละลายน้ำง่ายในไร่ นา หรือพื้นที่เกษตรกรรมก็ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำเพิ่มมากขึ้น (Odum, 1971)

สอดคล้องกับงานวิจัยของ (สิทธิชัย ดันธนะสฤทธ์, 2549ก) ว่าแหล่งน้ำฟอสฟอรัสเข้าสู่สิ่งแวดล้อมเกิดจากกิจกรรมทางการเกษตรของมนุษย์ โดยการใช้ปุ๋ยเพิ่มผลผลิตที่มีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบสำคัญทั้งปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ และจากมูลสัตว์ต่างๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่เลี้ยงสัตว์จะมีปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างสูงกว่าบริเวณอื่น และจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้พื้นที่ที่มีการทำอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โลหะขัดเงา โรงงานผลิตโลหะสำเร็จรูป โรงงานผลิตผงซักฟอก และโรงงานผลิตปุ๋ยฟอสฟอรัส เป็นต้น ก็เป็นสาเหตุให้ปริมาณฟอสเฟตในแหล่งน้ำสูงขึ้น ทั้งนี้การใช้ผงซักฟอกซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน หรือชุมชน (domestic waste) บางส่วนของปุ๋ยพีซีที่ถูกชะล้างลงสู่แม่น้ำลำคลอง (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2530) และปริมาณฟอสฟอรัสที่ลงสู่แหล่งน้ำโดยการปล่อยน้ำทิ้งจากชุมชนจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับความหนาแน่นของประชากร ปริมาณการใช้ปุ๋ย การใช้ที่ดิน คุณสมบัติของดิน ชนิดของน้ำทิ้งและระบบบำบัด (ณรรฐพล วัลสิทธิ์, 2532)

ในแหล่งน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของปริมาณฟอสฟอรัสมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดของแหล่งน้ำ หากแหล่งน้ำมีขนาดใหญ่ ฟอสฟอรัสจะมีโอกาสละลายอยู่ได้น้อย
- 2) ลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งน้ำ หากแหล่งน้ำตั้งอยู่ในเขตที่มีหินฟอสเฟต ก็จะทำให้ น้ำมีความเข้มข้นของฟอสเฟตสูง
- 3) ระยะใกล้ไกลจากแหล่งที่มีน้ำโสโครก หรืออินทรีย์สาร ถ้าแหล่งน้ำตั้งอยู่ใกล้แหล่งดังกล่าว น้ำไหลบ่าหน้าดินอาจนำฟอสฟอรัสลงมาในแหล่งน้ำได้มาก ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก็สูง
- 4) ความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจทำให้มีการตกตะกอนของฟอสฟอรัสออกไปจากน้ำได้

2.2 แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) เป็นแบบจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในระดับพื้นที่แม่น้ำ (River basin scale model) โดยเป็นแบบจำลองสาธารณสิทธิ์ (public domain model) พัฒนาขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1990 (พ.ศ. 2533) โดย Blackland Research Center, TAES และ United States Department of Agriculture–Agricultural Research Service (USDA–ARS) ประเทศสหรัฐอเมริกา (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998) (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011) ในประเทศไทยมีการนำมาใช้เมื่อปี พ.ศ. 2545 ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้กับการบูรณาการพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

แบบจำลอง SWAT สามารถเชื่อมโยงหรือปฏิสัมพันธ์ (interact) ได้กับข้อมูลระบบ GIS มีความสามารถในการประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเกษตร ตลอดจนผลกระทบในเชิงปริมาณของการจัดการพื้นที่แม่น้ำที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เนื่องจากมีการคำนวณผลลัพธ์ที่ต่อเนื่องระดับแม่น้ำ ประเภท continuous-time basin-scale hydrologic model ซึ่งมีการแบ่งพื้นที่แม่น้ำเป็นพื้นที่แม่น้ำย่อยและภายในพื้นที่แม่น้ำย่อยก็จะถูกแบ่งเป็น หน่วยจัดการอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units, HRUs) ที่ประกอบด้วย การซ้อนทับของชั้นข้อมูล การใช้ประโยชน์ที่ดิน การจัดการที่ดิน ความชื้นและคุณสมบัติของดินที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน (Gassman, Reyes, Green, & Arnold, 2007) (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005) (J.R. Williams, Arnold, Kiniry, Gassman, & Green, 2008) โดยสมมูลน้ำในแต่ละ HRUs ของลุ่มน้ำนั้นแบ่งตามแหล่งกักเก็บน้ำออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ แบ่งเป็นน้ำที่เกิดจากหิมะบนผิวดิน แบ่งจากหน้าตัดดิน (soil profile) ที่ความลึก 0-2 เมตร แบ่งตามชั้นน้ำระดับตื้น (shallow aquifer) ที่ความลึก 2-20 เมตร และแบ่งตามชั้นน้ำระดับลึก (deep aquifer) ที่ความลึกมากกว่า 20 เมตร (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Allen, 1999) นอกจากนี้ แบบจำลอง SWAT สามารถแบ่งองค์ประกอบได้ออกเป็น 8 ส่วน คือ อุทกวิทยา (hydrology) สภาพอากาศ (weather conditions) การตกตะกอน (sedimentation) อุณหภูมิของดิน (soil temperature) การเติบโตของพืช (crop growth) สารอาหารพืช (nutrients) ยาฆ่าแมลง (pesticides) และ การจัดการทางการเกษตร (agricultural management) (Arnold et al., 1998)

การวิเคราะห์และการคำนวณในแบบจำลอง SWAT แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนอุทกวิทยานบนผิวดิน (Land phase) และส่วนการเคลื่อนที่ในลำน้ำ (Routing phase) (Arnold, Williams, & Maidment, 1995)

2.2.1 การคำนวณทางอุทกวิทยานบนผิวดิน (Land phase)

เป็นการวิเคราะห์ในส่วนผิวดิน ซึ่งเป็นการศึกษาขั้นตอนกระบวนการของวัฏจักรทางอุทกวิทยา โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุตุนิยมวิทยาจะทำให้ไอน้ำในบรรยากาศ (atmospheric moisture) กลั่นตัวเป็นละอองน้ำและรวมกันเป็นหยดน้ำตกลงสู่ผิวโลกในรูปแบบต่างๆ เช่น ฝน (rainfall) หิมะ (snow) ลูกเห็บ (hail) น้ำแข็ง (ice) น้ำค้าง (dew) และน้ำค้างแข็งตัว (frost) เป็นต้น

โดยปริมาณการตกทั้งหมดอาจไม่ถึงพื้นดิน บางส่วนจะค้างอยู่ตามต้นไม้หรือพืชต่างๆ เรียกว่าการดัก (interception) ซึ่งจะมีการระเหย(evaporation) และการคายน้ำ(transpiration) กลับคืนสู่บรรยากาศ ส่วนฝนที่ตกลงสู่ผิวดินและที่ซังนองอยู่ตามผิวดินจะรวมตัวไหลลงสู่ที่ต่ำเป็นน้ำท่าอยู่ในแม่น้ำ บางส่วนจะเกิดการซึม(infiltration) ลงใต้ผิวดิน กลายเป็นน้ำที่ไหลในดิน(subsurface flow) ลงไปตามแรงดึงดูดของโลกจนถึงระดับน้ำใต้ดินที่มีน้ำอึดตัวซังอยู่หรือน้ำบาดาล(ground water) โดยจะไหลกลับลงสู่แม่น้ำลำธารเมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลานึง ด้วยการไหลไปทางด้านข้างของชั้นน้ำใต้ดิน ข้อมูลนำเข้าหลักของแบบจำลองในส่วนนี้จะประเภทข้อมูลเชิงกายภาพของแม่น้ำ ซึ่งได้แก่ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 1 ถึง 4) ข้อมูลภูมิอากาศ ประกอบด้วย ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดรายวัน ข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รายวัน ข้อมูลปริมาณความชื้นสัมพัทธ์รายวัน และข้อมูลความเร็วลม (2) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ประกอบด้วย ข้อมูลการเจริญเติบโตของพืช วันปลูก และวันเก็บเกี่ยวผลผลิต และ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 3 พิษณุโลก) ข้อมูลดิน ประกอบด้วย คุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นดิน

ดังนั้นอาจเรียกได้ว่า การคำนวณทางอุทกวิทยาส่วนบนบนพื้นดินในส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของแบบจำลอง SWAT ซึ่งแบ่งองค์ประกอบได้ออกเป็น 8 ส่วน คือ อุทกวิทยา (Hydrology) สภาพอากาศ (Weather conditions) การตกตะกอน (Sedimentation) อุณหภูมิของดิน (Soil Temperature) การเติบโตของพืช (Crop growth) สารอาหารพืช (Nutrients) ยาฆ่าแมลง (Pesticides) และ การจัดการทางการเกษตร (Agricultural Management)

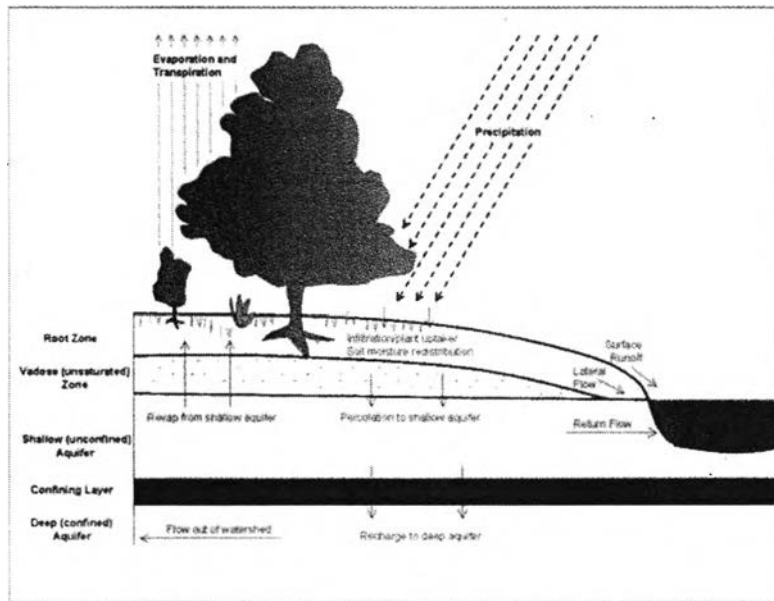
การประมาณค่าทางอุทกวิทยาจะใช้หลักการทางด้านสมดุลของน้ำของวัฏจักรทางอุทกวิทยา ดังรูปที่ 2-3 โดยปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในดิน จะเท่ากับปริมาณน้ำที่คืนได้รับมา คือ ปริมาณน้ำฝน และปริมาณน้ำชลประทาน ลบกับปริมาณน้ำที่คืนสูญหายไป คือ ปริมาณน้ำไหลบ่า ปริมาณการคายระเหย ปริมาณการซึมลึกลงใต้ดินของน้ำ และปริมาณการไหลลงแม่น้ำ สมการหลักคือ

สมการสมดุลของน้ำ

$$SW_t = SW_i + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (2-7)$$

เมื่อ

SW_t	คือ	ปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ (Available water capacity, AWC) (มิลลิเมตร)
t	คือ	ช่วงระยะเวลา i คือ เวลา (ประเทือง เซาว์วันกลาง)
R_i	คือ	ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร)
Q_i	คือ	ปริมาณน้ำไหลบ่า (มิลลิเมตร)
ET_i	คือ	ปริมาณการคายระเหย (มิลลิเมตร)
P_i	คือ	ปริมาณน้ำที่ซึมลงไปในดิน (มิลลิเมตร)
QR_i	คือ	ปริมาณน้ำที่ไหลลงแม่น้ำ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2-3 วัฏจักรทางอุทกวิทยา
(Neitsch et al., 2011)

ปริมาณน้ำท่าผิวดินรายวัน ในแบบจำลอง SWAT คำนวณจากปริมาณน้ำฝนรายวันโดยใช้วิธี Soil Conservation Service (SCS Curve Number) (U.S. Department of Agriculture, 1972) ดังสมการ (2-8) และ (2-9)

สมการ Soil Conservation Service (SCS)

$$Q_{surf} = \frac{(R-0.2s)^2}{R+0.8s}, R > 0.2s \quad (2-8)$$

$$Q_{surf} = 0.0, R \leq 0.2s \quad (2-9)$$

เมื่อ Q_{surf} คือ ค่าของน้ำท่ารายวัน (m^3/s)
 R คือ ค่าของฝนรายวัน (Committee on Water Quality Criteria)
 s คือ ปัจจัยด้านการกักเก็บน้ำไว้ในดิน (Retention parameter)

โดยค่า s จะมีความสัมพันธ์กับค่า Curve number (CN) ดังสมการ (2-10)

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (2-10)$$

เมื่อ S คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในดิน (มิลลิเมตร) ค่าคงที่ 254 มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และ CN คือ ค่า Curve Number ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างความยากง่ายของน้ำในการซึมผ่านชั้นดิน (Soil's permeability) การใช้ประโยชน์ที่ดิน และสถานะของน้ำในดินที่มีอยู่เดิม (Antecedent soil water conditions) ตามตารางที่ 2-1 CN จะมีค่าเท่ากับ $0 \leq CN \leq 100$

ตารางที่ 2-1 ค่า CN สำหรับพื้นที่ทำการเกษตร

(Soil Conservation Service Engineering Division, 1996)

Cover Type	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
Pasture, grassland, or range – continuous	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow – continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	-----	30	58	71	78
Brush – brush – weed – grass mixture with brush the major element	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods – grass combination (orchard or tree farm)	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	33	55	70	77
Farmsteads – buildings, lanes, driveways, and surrounding lots	-----	59	74	82	86

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CN

1) คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของกลุ่มดิน (Hydrologic soil group)

The U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS) Soil Survey Staff (1996) แบ่ง กลุ่มดินทางอุทกวิทยาตามลักษณะการซึมน้ำ (Infiltration) ของดินออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่ม A: ดินมีอัตราการไหลผิวดินต่ำ อัตราการซึมน้ำสูง ลักษณะที่สำคัญของกลุ่มดินนี้ คือ เนื้อดินเป็นดินทรายหรือกรวด (sandy soils)

- กลุ่ม B: ดินมีการระบายน้ำได้ดี อัตราการซึมปานกลาง ลักษณะที่สำคัญของกลุ่มดินนี้ ลักษณะที่สำคัญของกลุ่มดินนี้ คือ เป็นดินร่วน (loamy soils)
- กลุ่ม C: ดินมีอัตราการซึมน้ำต่ำ ประกอบด้วยชั้นดินอย่างน้อย 1 ชั้นที่ขัดขวางการระบายน้ำ ลักษณะที่สำคัญของกลุ่มดินนี้ คือ เป็นดินประเภทดินเหนียวปนทราย (sandy clay loam)
- กลุ่ม D: ดินมีอัตราการซึมน้ำต่ำมาก เป็นดินที่มีศักยภาพทำให้เกิดน้ำท่าผิวดินสูง ลักษณะที่สำคัญของกลุ่มดินนี้ คือ เป็นดินประเภทดินเหนียว (sandy clay loam)

2) สิ่งปกคลุม (Cover)

คือสิ่งต่างๆที่ปกคลุมดิน และป้องกันการกระแทกของเม็ดฝนที่ตกลงมาสู่ดิน ประกอบด้วย

- ลักษณะการใช้ที่ดิน (landuse)
- การรักษาหน้าดิน (land treatment) จะเกี่ยวข้องกับลักษณะและวิธีการปลูกพืช การเตรียมแปลง โดยแบ่งออกเป็น การทำการเพาะปลูกเป็นแถว (straight-row) การทำการเพาะปลูกเป็นแถวคล้ายตามระดับพื้นที่ (contoured) และ การทำการเพาะปลูกเป็นขั้นบันได (terraced)

3) สภาพอุทกวิทยา (hydrologic condition) โดยแบ่งออกเป็น

- สภาพเลว (poor) มีพืชคลุมดินพื้นที่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์
- สภาพปานกลาง (Fair et al.) มีพืชคลุมดินพื้นที่ระหว่าง 50 - 75 เปอร์เซ็นต์
- สภาพดี (good) มีพืชคลุมดินพื้นที่มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์

4) การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use classification)

- พื้นที่ป่า (wood, forest)
- พื้นที่เกษตรกรรม (U.S. Department of Agriculture)
- พื้นที่โล่งเตียน และ พื้นที่อยู่อาศัย (bare-land & residential)
- พื้นที่ที่เป็นน้ำ (water body)

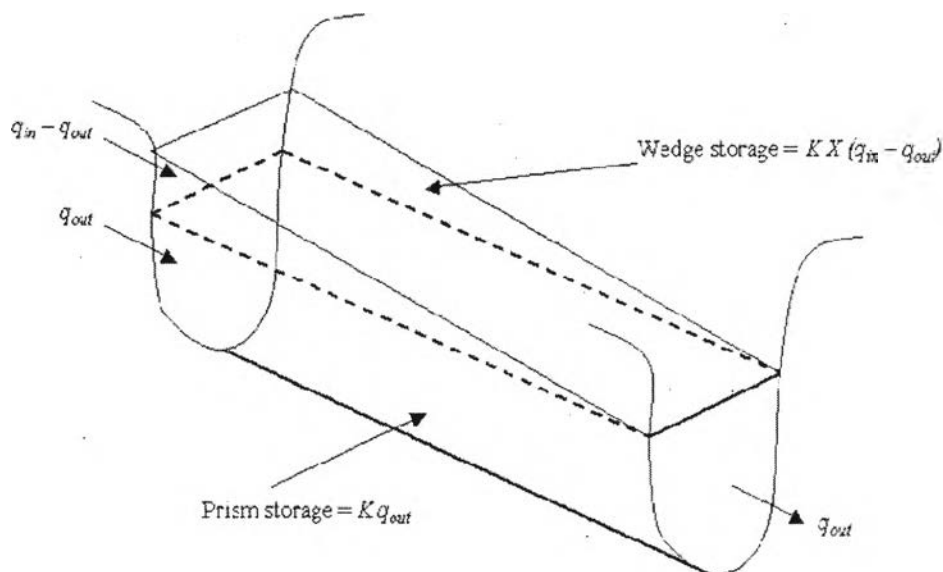
5) ความชื้นในดินเบื้องต้น (Antecedent moisture content; AMC)

ความชื้นในดินจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและการให้น้ำชลประทานสู่ดิน โดย CN Number จะมีค่าแตกต่างกันอยู่ 3 ค่าขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความชื้นในดิน คือ 1) ที่เงื่อนไขดินแห้งหรือเป็นจุดเหี่ยวเฉา(Wilting Point) 2) ที่เงื่อนไขความชื้นในดินเฉลี่ย 3) ที่เงื่อนไขดินอิ่มตัวหรือเป็นจุดความชื้นชลประทาน (Field Capacity) ซึ่งในแบบจำลอง SWAT จะให้ผู้ใช้ป้อนค่า CN Number ที่เงื่อนไขความชื้นเฉลี่ยลงไป แล้วแบบจำลองจะทำการคำนวณค่า CN Number ในเงื่อนไขที่เหลือ

2.2.2 การคำนวณทางอุทกวิทยาส่วนการเคลื่อนที่ในลำน้ำ (Routing phase)

เป็นส่วนของการการเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำ ประกอบด้วย การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านทางน้ำ (Channel routing) และ การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำ (reservoir routing)

1) การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านทางน้ำ ประกอบด้วย การเคลื่อนตัวของน้ำท่วมผ่านทางน้ำ การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านแหล่งกักน้ำ (Impoundment routing) การเคลื่อนตัวของตะกอนในทางน้ำ (Channel sediment routing) และการเคลื่อนตัวของสารอาหารและยาฆ่าแมลงผ่านทางน้ำ ซึ่งการจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำของแบบจำลอง SWAT ใช้วิธี Muskingum routing จะจำลองความจุลำนํ้าในช่วงการไหล โดยอาศัยหลักการสมมูลน้ำในลำน้ำของปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณน้ำไหลออก ในลักษณะการประกอบกันของลิ้ม (wedge) และปริซึมของการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำ

(Neitsch et al., 2011)

สมการการกักเก็บน้ำในลำน้ำ มีดังนี้

$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out}) \quad (2-11)$$

เมื่อ V_{stored}	คือ	ปริมาตรความจุของน้ำในลำน้ำ (m^3)
q_{in}	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำในลำน้ำ (cms.)
q_{out}	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำในลำน้ำ (cms.)
K	คือ	ค่าคงที่ของเวลาในการกักเก็บน้ำ (s)
X	คือ	ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ซึ่งในลำน้ำตามธรรมชาติมีค่าประมาณ 0.0-0.3

2) การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วย สมดุลของน้ำในอ่างเก็บน้ำและการเคลื่อนตัวผ่านอ่างเก็บน้ำ การเคลื่อนตัวของตะกอนผ่านอ่างเก็บน้ำ และ การเคลื่อนตัวของสารอาหารและยาฆ่าแมลง ซึ่งในแบบจำลอง SWAT จะต้องมีการกำหนดปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่จะควบคุมเวลาน้ำท่วม (Flood control; V_{fc}) ความจุของอ่างเก็บน้ำที่ระดับทางระบายน้ำหลัก (Principal spillway volume; V_{pr}) และความจุของอ่างเก็บน้ำที่ระดับทางระบายน้ำฉุกเฉิน (Emergency spillway volume; V_{em}) โดยสมการการเคลื่อนตัวของน้ำในอ่างเก็บน้ำมีดังนี้

$$V_{em} = V_{pr} + V_{fc} \quad (2-12)$$

2.2.3 การคำนวณปริมาณตะกอนในแบบจำลอง SWAT

การคำนวณปริมาณตะกอนในแบบจำลอง SWAT ประกอบด้วยกระบวนการ 2 ส่วน คือ การเกิดตะกอนจากผืนดิน (Upland) และ การตกตะกอนและการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ กล่าวคือ เริ่มต้นด้วยการเกิดตะกอนจากผืนดิน แล้วหลังจากนั้นปริมาณตะกอนในส่วนนี้จะไหลลงสู่ลำน้ำแล้วเคลื่อนที่ไปกับน้ำหรือบางส่วนก็จะตกตะกอนลงในท้องลำน้ำ โดยในแบบจำลอง SWAT จะใช้ทฤษฎีของทั้ง 2 ส่วนดังต่อไปนี้

1) การเกิดตะกอนจากผืนดิน (Upland)

ในส่วนนี้แบบจำลอง SWAT จะใช้สมการการสูญเสียดินสากล universal soil loss equation, USLE (J.R. Williams, 1995) แต่จะมีการปรับเปลี่ยนเพื่อจะนำมาใช้ในแบบจำลอง SWAT ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (2-13)$$

เมื่อ sed	คือ	ปริมาณตะกอนรายวัน (metric tons)
Q_{surf}	คือ	ปริมาณน้ำผิวดิน (mm H_2O/ha)
q_{peak}	คือ	อัตราการไหลของน้ำท่าสูงสุด (m^3/s)
$area_{hru}$	คือ	พื้นที่หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (ha)
K_{USLE}	คือ	ค่าปัจจัยความคงทนต่อการถูกชะล้างพังทลายของดิน
C_{USLE}	คือ	ค่าปัจจัยการจัดการพืช
LS_{USLE}	คือ	ค่าปัจจัยความยาวของความลาดเทและความชัน
$CFRG$	คือ	ปริมาณก้อนหินบนชั้นดินบน

2) การตกตะกอนและการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ

การคำนวณการเคลื่อนที่และตกตะกอนในแบบจำลอง SWAT ซึ่งมีวิธีการคำนวณหาค่าปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของตะกอนที่สามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำ ($conc_{sed, ch, mx}$) โดยมีสมการทั้งหมดดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์ปริมาณของตะกอนในลำน้ำคำนวณได้โดย

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (2-14)$$

เมื่อ

sed_{out} คือ ปริมาณของตะกอนในลำน้ำ ณ จุดที่พิจารณา (metric tons)

sed_{ch} คือ ปริมาณของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) ในลำน้ำ (metric tons)

V_{out} คือ ปริมาณของน้ำที่ไหลออกจากลำน้ำ ณ จุดที่พิจารณา รายวัน ($m^3 H_2O$)

V_{ch} คือ ปริมาณของน้ำในลำน้ำตลอดของความยาวลำน้ำในแต่ละลุ่มน้ำ ($m^3 H_2O$)

โดยที่ sed_{ch} ปริมาณของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) ในลำน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (2-15)$$

เมื่อ

sed_{ch} คือ ปริมาณของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) ในลำน้ำ (metric tons)

$sed_{ch,i}$ คือ ปริมาณของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment) ในลำน้ำเริ่มต้น (metric tons)

sed_{dep} คือ ปริมาณของตะกอนที่ตกตะกอน (sediment deposited) ในลำน้ำ (metric tons)

sed_{deg} คือ ปริมาณของตะกอนที่ถูกพัดพาไปกับน้ำ (sediment re-entrained) ในลำน้ำ (metric tons)

โดยที่ sed_{dep} และ sed_{deg} จะคำนวณโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยของ ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนในลำน้ำในแต่ละช่วงเวลา ($conc_{sed,ch,i}$) และ ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของตะกอนที่สามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำ ($conc_{sed,ch,mx}$) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } (conc_{sed,ch,i}) > (conc_{sed,ch,mx}) &\rightarrow sed_{dep} = (conc_{sed,ch,i} - conc_{sed,ch,mx}) \cdot V_{ch} \quad (2-16) \\ (conc_{sed,ch,i}) < (conc_{sed,ch,mx}) &\rightarrow sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) \cdot V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH} \end{aligned}$$

เมื่อ V_{ch} คือ ปริมาณของน้ำในลำน้ำตลอดของความยาวลำน้ำในแต่ละลุ่มน้ำ ($m^3 H_2O$)

K_{CH} คือ ปัจจัยความคงทนต่อการกัดกร่อนของลำน้ำ (channel erodibility factor)

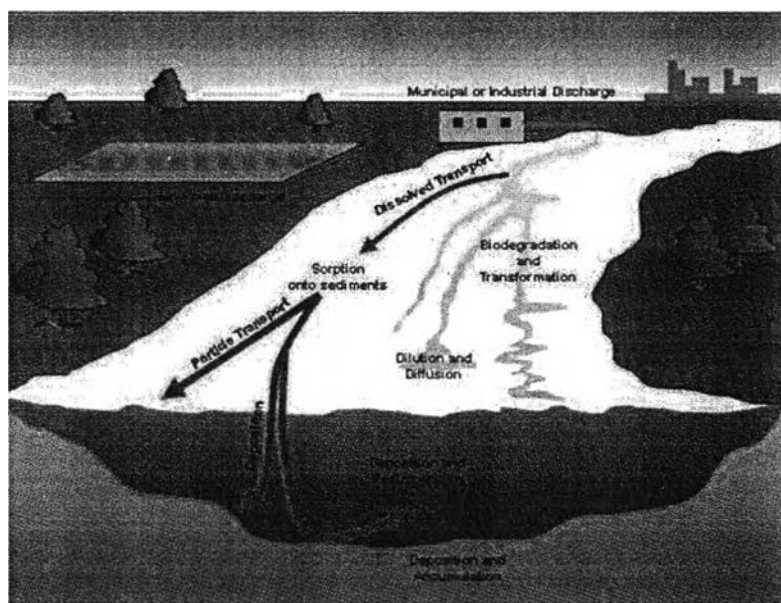
C_{CH} คือ ปัจจัยสิ่งปกคลุมลำน้ำ (channel cover factor)

และ ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของตะกอนที่สามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำ ($conc_{sed,ch,mx}$) จะเป็นฟังก์ชันของความเร็วการไหลของน้ำสูงสุดในลำน้ำ (Peak velocity) คือ

$$conc_{sed,ch,mx} = f(\text{peak velocity}) \quad (2-17)$$

2.2.4 การคำนวณคุณภาพน้ำในแบบจำลอง SWAT

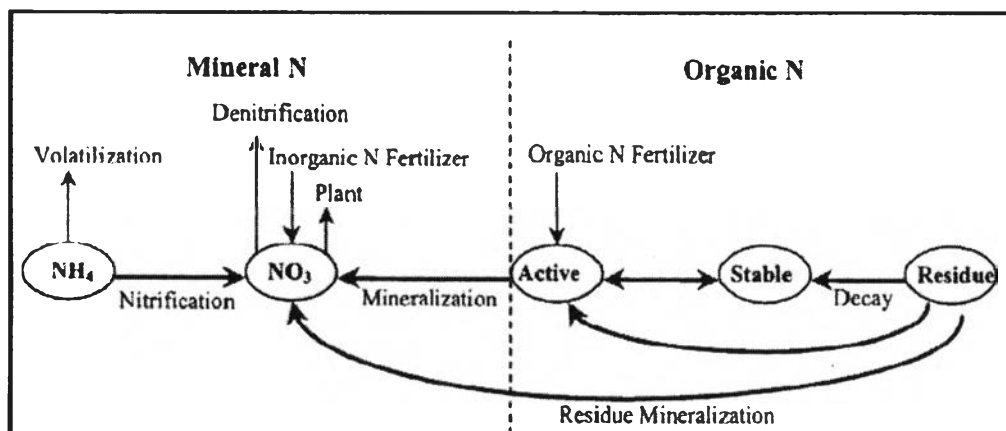
ในแบบจำลอง SWAT มีการจำลองคุณภาพน้ำเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของมลสารทางน้ำ สารเคมีและธาตุอาหาร ซึ่งแหล่งกำเนิดของมลพิษทางน้ำ แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แหล่งกำเนิดมลพิษที่แน่นอน หรือ Point Sources Pollution ได้แก่ ชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม ฟาร์มเลี้ยงสุกร และบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่แน่นอน หรือ Non-Point Sources Pollution ได้แก่ ของเสียจากการใช้สารเคมีในพื้นที่เกษตรกรรมต่างๆ อาทิ นาข้าว สวนผลไม้ สวนผัก เป็นต้น โดยแหล่งกำเนิดมลพิษต่างๆดังกล่าวจะมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำทั้งที่ได้รับการบำบัดแล้วและยังไม่ได้รับการบำบัด ซึ่งมลสารหรือมลพิษเหล่านี้จะไหลไปตามลำน้ำและจะเจือจางไปเรื่อยๆตามความยาวของลำน้ำ (J.R. Williams & Hann, 1972) ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ส่วนของการเคลื่อนที่ของมลสารในแบบจำลอง SWAT
(Williams and Hann, 1972)

2.2.4.1 การคำนวณปริมาณไนเตรทในแบบจำลอง SWAT

แบบจำลองมีการจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของวัฏจักรไนโตรเจนในดิน น้ำและอากาศ ซึ่งในกระบวนการจะอธิบายเรื่องการแพร่กระจายมลสารตลอดจนกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในชั้นดินและที่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นที่ความลึกไม่เกิน 20 เมตร โดยสารอินทรีย์ ได้แก่ NH_4^+ และ NO_3^- สารอินทรีย์ ได้แก่ อินทรีย์ไนโตรเจนจากเศษซากพืช จุลินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต และอินทรีย์ไนโตรเจนจากสารอินทรีย์ที่ถูกกระตุ้นในดิน ซึ่งความสัมพันธ์กันระหว่างกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆในวัฏจักรอย่างต่อเนื่องเป็นระบบจะถูกจำลองในแบบจำลอง SWAT



รูปที่ 2-6 การจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของไนโตรเจนในแบบจำลอง SWAT
(Neitsch et al., 2005)

หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ของแบบจำลอง SWAT จะจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2-6 เมื่อพืชมีความต้องการนำไนโตรเจนไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตจากดิน ซึ่งในดินที่มีส่วนประกอบของอินทรีย์ไนโตรเจนและไนเตรท ไนโตรเจนจะถูกกำหนดและคำนวณปริมาณไนโตรเจนในดินโดยแบบจำลอง (McElroy, Chiu, Nebgen, Aleti, & Bennett, 1976) ซึ่งไนเตรท ไนโตรเจนจะถูกพัดพาหรือแพร่กระจายไปกับปริมาณน้ำท่า การไหลในแนวข้างของน้ำท่า (lateral flow) และการไหลซึมของน้ำในชั้นดิน (percolation) โดยมีกระบวนการเคลื่อนที่ของไนเตรทในดินสู่แหล่งน้ำ ดังสมการ

$$NO3_{surf} = \beta_{NO3} \cdot conc_{NO3,mobile} \cdot Q_{surf} \quad (2-18)$$

โดย

$NO3_{surf}$ คือ ปริมาณไนเตรทเคลื่อนที่ย้ายสู่น้ำไหลบ่าหน้าดิน (kg N/ha)

β_{NO3} คือ สัมประสิทธิ์การซึมลึก (percolation) ของไนเตรท

$conc_{NO3,mobile}$ คือ ความเข้มข้นไนเตรทที่เคลื่อนที่ได้ ที่ระดับความลึก 10 มิลลิเมตร ในชั้นไทรพรวน (kg N/mm H_2O)

Q_{surf} คือ น้ำไหลบ่าหน้าดินต่อวัน (mm H_2O)

ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนในดินจะถูกนำพาไปกับตะกอนในน้ำ (J.R. Williams & Hann, 1978) โดยมีกระบวนการเคลื่อนที่ดังสมการ

$$orgN_{surf} = 0.001 \cdot conc_{orgN} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \epsilon_{N:sed} \quad (2-19)$$

โดย

$orgN_{surf}$ คือ ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำไหลบ่าหน้าดินที่ถูกพัดพาลงสู่ลำน้ำ (kg N/ha)

$conc_{orgN}$ คือ ความเข้มข้นอินทรีย์ไนโตรเจนในดินที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (g N/metric ton soil)

sed คือ ปริมาณตะกอนที่ถูกชะล้างหน้าดินต่อวัน (metric tons)

$area_{hru}$ คือ พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยทางอุทกวิทยา (HRUs) (ha)

$\varepsilon_{N:sed}$ คือ อัตราส่วนผลผลิตไนโตรเจน

ซึ่งความเข้มข้นของอินทรีย์ไนโตรเจนชั้นหน้าดิน $orgN_{surf}$ คำนวณได้จาก

$$conc_{orgN} = 100 \cdot \frac{(orgN_{fresh,surf} + orgN_{sta,surf} + orgN_{act,surf})}{\rho_b \cdot depth_{surf}} \quad (2-20)$$

$orgN_{fresh,surf}$ คือ ไนโตรเจนจากการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน (kg N/ha)

$orgN_{sta,surf}$ คือ อินทรีย์ไนโตรเจนในรูป stable ในดิน (kg N/ha)

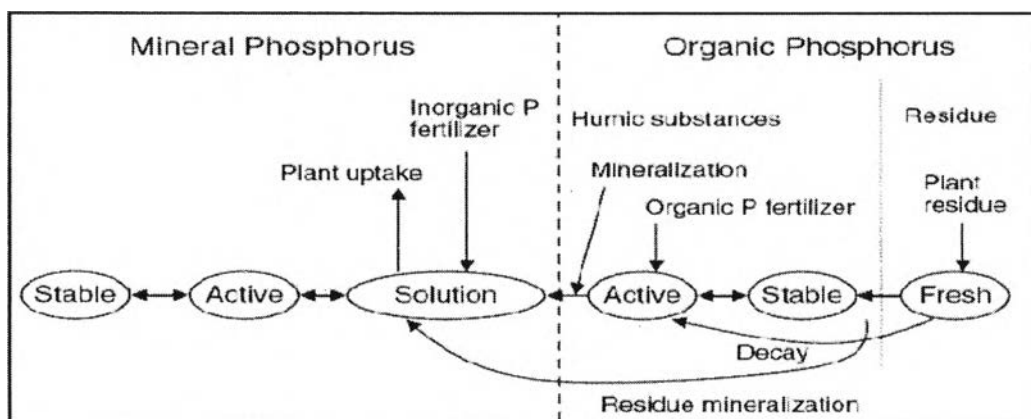
$orgN_{act,surf}$ คือ อินทรีย์ไนโตรเจนในรูป active ในดิน (kg N/ha)

ρ_b คือ ค่าความหนาแน่นในดินชั้นบนสุด (Mg/m^3)

$depth_{surf}$ คือ ความลึกของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร

2.2.4.2 การคำนวณปริมาณฟอสเฟตในแบบจำลอง SWAT

ปริมาณฟอสฟอรัสที่คำนวณโดยแบบจำลอง SWAT ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของฟอสฟอรัส ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยอินทรีย์ฟอสฟอรัสและวัฏจักรฟอสฟอรัสในเศษซากพืชและจุลินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต โดยกระบวนการในการแพร่กระจายของฟอสฟอรัสนั้นรวมถึงการที่องค์ประกอบธาตุในอินทรีย์สารที่ยังมีชีวิตอยู่หรือตายแล้วเปลี่ยนไปเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งสามารถถูกใช้ในวัฏจักรของสิ่งมีชีวิตอีกด้วย (Neitsch et al., 2005a)



รูปที่ 2-7 การจำลองกระบวนการเคลื่อนที่ของฟอสเฟตในแบบจำลอง SWAT

(Neitsch et al., 2005)

กระบวนการแพร่กระจายของปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ในแบบจำลอง SWAT ดังแสดงในรูปที่ 2-7 สารจะถูกเคลื่อนย้ายไปกับปริมาณน้ำท่า ซึ่งความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้จะอยู่ที่ระดับความลึกไม่เกิน 10 มิลลิเมตรของชั้นดิน (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005b) นอกจากนี้เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตลงไปในดินจะมีการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดินและตกตะกอนในดินเป็นสารฟอสเฟตที่ละลายได้ยากสารประกอบเหล่านี้มีการละลายน้ำต่ำ เมื่อละลายแล้วก็จะเป็ประโยชน์ต่อพืชต่อไป โดยมีกระบวนการเคลื่อนที่ของสารละลายฟอสฟอรัสในดินสู่แหล่งน้ำ ดังสมการ

$$P_{surf} = \frac{P_{solution,surf} \cdot Q_{surf}}{\rho_p \cdot depth_{surf} \cdot k_{d,surf}} \quad (2-21)$$

โดย

P_{surf} คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้เคลื่อนย้ายสู่น้ำไหลบ่าหน้าดิน (kg P/ha)

$P_{solution,surf}$ คือ ปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายที่ระดับ 10 มิลลิเมตร

Q_{surf} คือ น้ำไหลบ่าหน้าดินต่อวัน (mm H₂O)

ρ_p คือ ค่าความหนาแน่นในดินชั้นบนสุด (Mg/m³)

$depth_{surf}$ คือ ความลึกของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร

$k_{d,surf}$ คือ สัมประสิทธิ์ฟอสฟอรัสในดิน (m³/Mg)

ปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่ถูกพัดพาไปกับตะกอนในลำน้ำ โดยมีกระบวนการเคลื่อนที่

ดังสมการ

$$sedP_{surf} = 0.001 \cdot conc_{sedP} \cdot \frac{sed}{area_{hru}} \cdot \epsilon_{P:sed} \quad (2-22)$$

โดย

$sedP_{surf}$ คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกพัดพาไปกับตะกอนในน้ำไหลบ่าหน้าดินลงสู่ลำน้ำ (kg P/ha)

$conc_{sedP}$ คือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในดินที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (g P/metric ton soil)

sed คือ ปริมาณตะกอนที่ถูกชะล้างหน้าดินต่อวัน (metric tons)

$area_{hru}$ คือ พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยทางอุทกวิทยา (HRUs) (ha)

$\epsilon_{P:sed}$ คือ อัตราส่วนผลผลิตฟอสฟอรัส

ซึ่งความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ติดไปกับตะกอนชั้นหน้าดิน $conc_{sedP}$ คำนวณได้จาก

$$conc_{sedP} = 100 \cdot \frac{(minP_{act,surf} + minP_{sta,surf} + orgP_{hum,surf}) + orgP_{frsh,surf}}{\rho_b \cdot depth_{surf}} \quad (2-23)$$

$minP_{act,surf}$	คือ ฟอสฟอรัสรูป active ของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (kg P/ha)
$minP_{sta,surf}$	คือ ฟอสฟอรัสรูป stable ของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (kg P/ha)
$orgN_{hum,surf}$	คือ อินทรีย์ฟอสฟอรัสของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (kg P/ha)
$orgP_{frsh,surf}$	คือ ฟอสฟอรัสรูป fresh ของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร (kg P/ha)
ρ_b	คือ ค่าความหนาแน่นในดินชั้นบนสุด (Mg/m^3)
$depth_{surf}$	คือ ความลึกของดินชั้นบนสุดที่ระดับ 10 มิลลิเมตร

2.2.5 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

2.2.5.1 สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัดจริง (Graphical Comparisons) โดยการพล็อตกราฟการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time series plots) ของค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองกับค่าตรวจวัดของพารามิเตอร์ตัวเดียวกันในเวลาเดียวกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของปริมาณการไหลของน้ำท่า ความเข้มข้นของตะกอนในน้ำท่า เป็นต้น

2.2.5.2 Coefficient of determination (R^2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด เป็นกระบวนการสถิติที่ใช้อธิบายความผันแปรของปัจจัยหนึ่งที่เกิดจากความสัมพันธ์กับอีกปัจจัยหนึ่งเชิงเส้นตรง R^2 จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง ปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมากขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-24

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (2-24)$$

เมื่อ R^2 คือ Coefficient of determination, i คือ ลำดับที่, n คือ จำนวนที่เก็บข้อมูลทั้งหมด, O_i คือ ค่าที่ได้จากการวัดลำดับที่ i , \bar{O} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการวัดทั้งหมด, P_i คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ i และ \bar{P} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด ทั้งนี้ (Donigian, 2002) ได้ให้เกณฑ์ของค่า R^2 และ r สำหรับกำหนดระดับประสิทธิภาพการใช้งานของแบบจำลอง (model performance) ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 เกณฑ์ในการใช้ค่า R^2 และ r ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเส้นกำหนดประสิทธิภาพในการทำนายผลของแบบจำลอง

พารามิเตอร์ทางสถิติ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้ในระดับต่างๆ			
R	← 0.75	0.80	0.85	0.90 → 0.96 →
R^2	← 0.6	0.7	0.8	0.9 →
Daily	แยء Poor	พอใช้ Fair	ดี Good	ดีมาก Very Good
Monthly	แยء Poor	พอใช้ Fair	ดี Good	ดีมาก Very Good

2.2.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Model sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว เป็นการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับหรือเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง หากผลลัพธ์ที่ได้เกิดความอ่อนไหวต่อค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ตัวใด ก็จะเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของพารามิเตอร์เหล่านั้นต่อการที่จะนำมาใช้ประกอบการพิจารณาในแบบจำลอง

วิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo) เป็นวิธีที่มีความนิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Beven & Binley, 1992) ซึ่งวิธีนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หรือตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลองที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามหรือผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง (Morgan & Herion, 1990) โดยใช้หลักความน่าจะเป็นเข้ามาช่วยในการพิจารณาต่อการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับพารามิเตอร์หรือตัวแปรอิสระดังกล่าว การดำเนินการจะทำการจำลองเหตุการณ์ซ้ำๆ แต่มีจำนวนครั้งที่แน่นอน เพื่อให้ได้ค่าต่างๆของผลลัพธ์ตัวแปรตามที่แตกต่างกัน (Karuchit, 2002)

2.2.7 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Model uncertainty analysis)

ความไม่แน่นอน (uncertainty) เป็นสิ่งที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยเกิดจากหลายสาเหตุ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ (Helton, 1993) ได้แก่

2.2.5.1 Scenario Uncertainty หรือความไม่แน่นอนของสถานการณ์ โดยมีสาเหตุจากการสูญหายของข้อมูล ข้อมูลไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการคาดการณ์ นอกจากนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเตรียมข้อมูลน้ำเข้าแบบจำลองหรืออาจมีสาเหตุเกิดจากการเลือกแบบจำลองที่ไม่ถูกต้องเหมาะสมต่อการนำไปใช้

2.2.5.2 Parameter Uncertainty หรือความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ อันมีสาเหตุมาจากข้อมูลเกิดความคลาดเคลื่อน เช่น ข้อมูลมีจำนวนน้อยเกินไป ความผิดพลาดจากการตรวจวัดจริงหรือผิดพลาดจากการสุ่มตัวอย่าง เป็นต้น

2.2.5.3 Model Uncertainty หรือความไม่แน่นอนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของความสามารถของแบบจำลองในการคาดการณ์หรือพยากรณ์ให้ได้ใกล้เคียง

กับความเป็นจริง นอกจากนี้ ความไม่แน่นอนของแบบจำลองยังมีสาเหตุเกิดจากโครงสร้างแบบจำลอง (model structure) รายละเอียดแบบจำลอง (model detail) ความถูกต้อง (validation) หรือการประเมิน การคาดการณ์ (extrapolation) เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง SWAT ในต่างประเทศ

(Pohlert, Huisman, Breuer, & Frede, 2005) ได้ใช้แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ในการจำลองการปลดปล่อยมลสารไนเตรทบริเวณจุดที่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่นอนและจุดที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (point and non-point source) ดำเนินการศึกษาระยะยาวที่เมือง Dill ตอนกลางของเมือง Hesse ประเทศเยอรมัน ซึ่งลักษณะทางธรณีวิทยาประกอบด้วยถ่านหินและดินทราย โดยข้อมูลจากจุดจุดที่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่นอนมีจำนวน 4 แหล่ง คือ จุดโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาลจำนวน 3 แหล่ง และโรงถลุงเหล็ก ซึ่งมีการใช้กรดไนตริกในกระบวนการถลุงแร่ ส่วนข้อมูลจากจุดที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่นอน ได้แก่พื้นที่เกษตรกรรมพืชที่ปลูกส่วนใหญ่คือ ข้าวโอ๊ตและข้าวบาร์เลย์ ซึ่งมีการเพาะปลูก 3 รอบต่อปี งานวิจัยแสดงผลการปลดปล่อยปริมาณไนเตรททั้งในลักษณะรายวันและรายเดือน โดยทำการสอบเทียบแบบจำลองในช่วงปี 2000 ถึงปี 2002 และการสอบทานดำเนินการในช่วงปี 2002 ถึงปี 2003 ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการจำลองการไหลของไนเตรทที่ถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแบบรายเดือนให้ค่าที่ดีกว่าการแสดงผลแบบรายวัน

(Hu, McIsaac, David, & Louwers, 2007) ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT เพื่อทำนายผลปริมาณไนเตรทที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบริเวณต้นน้ำของกลุ่มน้ำ Embarras ในตะวันออกเฉียงกลางของรัฐ Illinois สหรัฐอเมริกา พื้นที่รับน้ำ 482 ตารางกิโลเมตรโดยการนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณน้ำท่าและเชื่อมโยงต่อการหาปริมาณไนเตรทที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่ร้อยละ 97 ปลูกข้าวโพดถั่วเหลือง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการใส่ปุ๋ยและมีการไถพรวนทำให้เป็นแหล่งปลดปล่อยไนเตรทจากปุ๋ยลงสู่แม่น้ำ แบบจำลองมีการปรับเทียบในช่วงปี 1994 ถึง ปี 2002 (9 ปี) และการสอบทานทำในช่วงปี 1985 ถึงปี 1993 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ของปริมาณไนเตรทที่ถูกปลดปล่อยมีค่าอยู่ในช่วง 0.36 ถึง 0.74 จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองได้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรทโดยจะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 50 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไนเตรทที่ได้จากแบบจำลองช่วงฤดูฝนสูงกว่าช่วงฤดูแล้ง

(Vassilios, Christos, Georgios, & Gikas, 2009) ศึกษาปริมาณน้ำท่าและปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต โดยใช้ Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ทำการศึกษาในแม่น้ำ Kosynthos ในตอนเหนือของประเทศกรีซ ความยาวลำน้ำ 52 กิโลเมตร พื้นที่รับน้ำ 440 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย 32 ลำน้ำย่อย โดยแหล่งที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ Kosynthos ประกอบด้วยพื้นที่เกษตรกรรม ชุมชน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ทำการศึกษาในช่วงปี 2003 ถึง 2006 มีการหาปริมาณน้ำท่าและสร้างภาพเหตุการณ์ที่

แตกต่างกันตามรูปแบบการจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่และรอบของการปลูกพืช เพื่อทำนายปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อย โดยมีการตั้งสถานการณ์การใช้ที่ดิน ได้แก่ (A) การขยายพื้นที่เกษตรกรรม (B) ป่าถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ในพื้นที่แม่น้ำย่อย (C) การขยายเขตเมืองในพื้นที่แม่น้ำย่อย เหตุการณ์ทั้งสามแห่งนี้ส่งผลให้เกิดปริมาณไนเตรท และฟอสเฟตเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝนและลดลงในหน้าแล้ง เหตุการณ์ที่ป่าถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ เป็นสิ่งหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดกับคุณภาพน้ำ โดยผลลัพธ์ของแบบจำลองอยู่ในระดับดีและน่าเชื่อถือต่อการตัดสินใจเมื่อได้ทำการสอบเทียบในช่วงปี 2003 ถึงปี 2005 และการสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองดำเนินการในช่วงปี 2005

(Alansi, 2009) ประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT ในการจำลองและพยากรณ์การไหลของน้ำ ในแม่น้ำ Bernam ตอนบน ประเทศมาเลเซีย โดยใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน 27 ปี ตั้งแต่ปี (1981-2007) โดยการจำลองรูปแบบการใช้ที่ดิน 5 สถานการณ์ ผลของเหตุการณ์พบว่า มีระดับความลึกของการไหลสะสมรายปีเพิ่มขึ้น จาก 8% เป็น 39% ในขณะที่เพิ่มขึ้นจาก 16% เป็น 59% ในเดือนที่มีอัตราการไหลสูง และลดลงจาก 3% เป็น 32% ในเดือนที่มีการไหลต่ำ นอกจากนี้ยังได้มีการพยากรณ์การไหล 15 รูปแบบสำหรับอนาคตในปี 2020 พบว่าลดลงถึง 50% ของความต้องการน้ำรายเดือน ในช่วงที่มีการไหลต่ำ

(Jamshidi & Tajrishy, 2010) ประเมินมลพิษปริมาณไนเตรททั้งที่มาจากแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (point source) และจากแหล่งกำเนิดที่ไม่แน่นอน (non-point source) ด้วยแบบจำลอง SWAT บริเวณแม่น้ำ Jajrood ในประเทศอิหร่าน ผลจากการปรับเทียบน้ำทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่า Nash-Sutcliffe efficiency (E) อยู่ในช่วง 0.81-0.82 และจากการสอบทานให้ค่าในช่วง 0.57-0.61 นอกจากนี้จากการปรับเทียบและสอบทานปริมาณไนเตรทรายวันยังให้ค่า R^2 และค่า E ในช่วง 0.55-0.59 และ 0.36-0.56 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการคำนวณจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่ไม่ได้รับการบำบัดและระบบบำบัดน้ำทิ้งที่มีการชำระเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ไนเตรทถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำเป็นอย่างมาก อีกทั้งน้ำท่าที่มาจากสวนผลไม้ก็เป็นแหล่งปลดปล่อยไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าพื้นที่ทุ่งหญ้า และในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมิถุนายนพบว่าเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำท่าสูงสุด ซึ่งในขณะเดียวกันช่วงเวลาดังกล่าวก็พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทในแหล่งน้ำอีกด้วย

(Mishra & Kar, 2012) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ในการสอบเทียบและสอบทานเพื่อทำนายปริมาณน้ำท่า การเคลื่อนตัวของตะกอนและมลสารจากแหล่งที่ไม่ทราบจุดกำเนิดที่แน่นอน (non-point source, NPS) ของแม่น้ำ Banha ในประเทศอินเดีย โดยมีพื้นที่รับน้ำ 1,695 เฮกแตร์ ซึ่งในแม่น้ำนี้ได้รับอิทธิพลจากมรสุมตั้งแต่เดือนมิถุนายนจนถึงเดือนกันยายนตลอดทั้งปี ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองให้ผลการปรับเทียบของปริมาณน้ำท่าในระดับที่ดีมากและมลสารจากแหล่งที่ไม่ทราบจุดกำเนิดที่แน่นอนมีความสัมพันธ์กับช่วงฤดูแล้ง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นได้ว่าควรให้ความสนใจกับการจัดการปริมาณตะกอนและปริมาณมลสารจากแหล่งที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดแน่นอนที่มีปริมาณมากในบริเวณท้ายน้ำของแม่น้ำ

(Takeda, 2012) ศึกษาผลกระทบของตะกอนแขวนลอย ปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตจากการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำ Hii ประเทศญี่ปุ่น พบว่าพื้นที่ที่มีการเพาะปลูก

ทางเกษตรกรรมมีปริมาณตะกอนแขวนลอย (SS) ปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตในปริมาณมากกว่าพื้นที่ป่าไม้ ทั้งยังมีค่ามากสุดในช่วงฤดูฝน นอกจากนี้ยังพบปริมาณตะกอนและฟอสเฟตในน้ำสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่นาข้าวและพื้นที่เกษตร ซึ่งแหล่งที่มาของไนเตรทและฟอสเฟตส่วนใหญ่มาจากการจัดการทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ปุ๋ยในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ควรให้ความสนใจต่อการแก้ปัญหามลพิษในแหล่งน้ำเป็นอันดับแรก

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง SWAT ในประเทศไทย

(กิตติพงษ์ ธนาศิริยะกุล, 2546) ศึกษาการประเมินสัมพันธภาพลำน้ำย่อยด้วยแบบจำลอง SWAT/GIS บริเวณพื้นที่แม่น้ำแม่ต้นตอนบน จ.เชียงใหม่ เนื้อที่ประมาณ 1500 ตร.กม. ใช้โปรแกรม Data Analysis เพื่อเป็นเครื่องมือในการสอบเทียบ โดยการแยก Base Flow จากน้ำท่าโดยวิธี Hysep ผลการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง กับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ บ้านหลวง ได้ผลลัพธ์สำหรับปริมาณการไหลรวมเฉลี่ยทั้งปี คือร้อยละ 3 และได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.5795 ในส่วนของสถานีวัดน้ำป่าคาได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.5361 แต่ในการศึกษานี้ได้กล่าวถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ว่าในส่วนที่เป็นพื้นที่เล็กลง จะไม่มีผลต่อการจำลอง และในแต่ละหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ของพื้นที่แม่น้ำย่อยจะสมมติให้ว่ามีลักษณะเหมือนกันทั้งพื้นที่ แม่น้ำย่อยๆ นั้น

(โอฬาร เวศอุไร, 2548) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ต่อน้ำท่าในพื้นที่แม่น้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ตามพื้นที่แบบกระจายค่าพารามิเตอร์ โครงข่ายลำน้ำจำลองจากข้อมูล DEM นำเข้าข้อมูลการใช้ที่ดิน ในปี พ.ศ. 2520, 2537, และ 2544 เป็นตัวแทนการเปลี่ยนแปลง ใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ตรวจวัดรายเดือนต่อเนื่อง 5-10 ปี จากการใช้แบบจำลอง SWAT พบว่าโครงข่ายลำน้ำที่จำลองขึ้น มีความใกล้เคียงกับสภาพลำน้ำจริง และปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในขนาดที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ในแต่ละช่วงของการเปลี่ยนแปลง ยังได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ โดยปรับแก้ตามช่วงที่แนะนำจากแบบจำลอง ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่พารามิเตอร์ที่อ่อนไหวคือ คุณลักษณะทางกายภาพ เช่น ปริมาณน้ำที่ยอมให้มีในดิน และค่า Curve Number (CN) แบบจำลองที่ได้รับการปรับเทียบของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงถูกนำมาใช้ประมาณค่าปริมาณน้ำท่าจากข้อมูลตรวจวัดน้ำฝนรายวันในช่วง พ.ศ. 2541-2545 เพื่อประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และยังสามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงจากที่ทำการศึกษาอีก 3 กรณี คือ กรณีที่ป่าเพิ่มขึ้น กรณีที่พื้นที่เกษตรเพิ่มขึ้น และกรณีพื้นที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้น ซึ่งในแต่ละกรณีให้ผลของปริมาณน้ำท่าที่แตกต่างกัน

(ลิมป์ชัย ปรัชญาสิทธิกุล, 2549) ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT ในการจัดการทรัพยากรน้ำ ในพื้นที่แม่น้ำทะเลสาบสงขลา โดยการวิเคราะห์ใช้หลักการความสมดุลของน้ำ (Water Balance) เพื่อศึกษาศักยภาพของปริมาณน้ำต้นทุน และความต้องการใช้น้ำในกิจการต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ภาวะความขาดแคลนน้ำหรือความพอเพียงของปริมาณน้ำต้นทุนกับความต้องการใช้น้ำ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำต้นทุนในช่วงเวลาที่พิจารณาระหว่างปี พ.ศ. 2518 – 2547 มีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีประมาณ 6,051.16 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2547 มีการขาดแคลนน้ำ

เพื่อการชลประทาน จากความต้องการน้ำประมาณ 1,005.74 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี คือ 281.64 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือร้อยละ 28 ของความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานทั้งหมด และเหลือเป็นน้ำท่าที่ระบายลงสู่ทะเลสาบสงขลา เฉลี่ยปีละ 5,345.34 ล้านลูกบาศก์เมตร มีการคาดการณ์ไปในอนาคตว่า ในปีพ.ศ. 2557 จะมีความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นเป็น 1,225.86 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี มีการขาดแคลนน้ำ 326.02 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และมีปริมาณน้ำที่ระบายลงสู่ทะเลสาบสงขลาเฉลี่ยปีละ 5,198.01 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

(เทวินทร์ แก้วเมืองมูล & ชาญชัย แสงชโยสวัสดิ์, 2552) ศึกษาอิทธิพลของการเกษตรต่อปริมาณน้ำในพื้นที่แม่น้ำท่า โดยใช้แบบจำลอง SWAT กล่าวว่าแบบจำลองอุทกวิทยา SWAT สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่แม่น้ำแม่ท่าได้ และคำนวณอัตราการไหลของน้ำและปริมาณน้ำท่าของแต่ละแม่น้ำย่อยได้ แต่แบบจำลอง SWAT ต้องการข้อมูลจำนวนมากเพื่อให้ แบบจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะข้อมูลการจัดการอ่างเก็บน้ำ เช่น ปริมาณน้ำที่กักเก็บในแต่ละเดือน อัตราการปล่อยน้ำในแต่ละวัน รวมไปถึงข้อมูลภูมิอากาศที่ต้องใช้ข้อมูลในพื้นที่ ในบางพื้นที่ที่ขาดข้อมูลก็ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ได้ยาก และผลการคำนวณจะไม่ถูกต้องและไม่แม่นยำ

(สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร, 2555) ดำเนินการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล เกี่ยวกับการวิเคราะห์สมดุลน้ำนอกเขตพื้นที่ชลประทานในแม่น้ำกก โดยใช้แบบจำลอง SWAT โดยการแบ่งขอบเขตแม่น้ำย่อยสำหรับเปรียบเทียบแบบจำลอง ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองประกอบด้วยสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 14 สถานี และสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 3 สถานี จากการพิจารณาสถิติข้อมูลและสภาพความเป็นจริง จึงเลือกช่วงข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งปีน้ำน้อย น้ำมากและน้ำปานกลาง มาสอบเทียบแบบจำลองในปี พ.ศ.2543 ถึงปี พ.ศ.2547 ซึ่งผลการสอบเทียบแบบจำลองและค่าทางสถิติ เมื่อพิจารณาจากค่า Accumulated Mass Balance พบว่าอยู่ในเกณฑ์ดีและค่า Square of Correlation Coefficient (R^2) มีความเข้ากันได้ค่อนข้างดี ทำให้สามารถนำพารามิเตอร์ของแม่น้ำดังกล่าวมาใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าสำหรับแม่น้ำย่อยอื่นๆ ได้

(ปริญา ขาวารี, 2555) ศึกษาผลของพื้นที่ปลูกยางพาราต่อคุณภาพน้ำ บริเวณพื้นที่แม่น้ำตรัง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงแล้ง (มกราคม กุมภาพันธ์ และมีนาคม พ.ศ. 2554) และช่วงหลาก (พฤษภาคม มิถุนายน และกรกฎาคม พ.ศ. 2554) พร้อมทั้งสร้างภาพเหตุการณ์ 3 เหตุการณ์ คือ ภาพเหตุการณ์ที่ 1 คือ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้ทั้งหมดเป็นพื้นที่ปลูกยางพาราใหม่ ภาพเหตุการณ์ที่ 2 คือ การเปลี่ยนพื้นที่ปลูกยางพาราที่อยู่ในพื้นที่อนุรักษ์เป็นพื้นที่ป่าไม้ และภาพเหตุการณ์ที่ 3 คือ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่เกษตรกรรมอื่นเป็นพื้นที่การปลูกยางพาราใหม่ จากผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำในแม่น้ำตัวแทนป่าไม้และยางพารา เมื่อพิจารณาช่วงแล้งและหลากพบว่าคุณภาพน้ำทุกพารามิเตอร์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งในพื้นที่แม่น้ำตัวแทนป่าไม้และยางพารา นอกจากนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และผลจากการใช้แบบจำลอง SWAT ประเมินปริมาณไนเตรทและฟอสเฟต พบว่าผลของการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตในแหล่งน้ำแต่อยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

(ศรายุทธ วงษาศรี, 2555) ประเมินปริมาณและคุณภาพน้ำในแม่น้ำพองตอนล่างอันเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเอทานอลโดยใช้แบบจำลอง SWAT ในการสอบเทียบปริมาณน้ำท่าของแบบจำลองช่วงปี 2547-2550 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันอยู่ในระดับที่ดีให้ค่า $R^2 = 0.903$ มีการจำลองสถานการณ์ 2 ส่วนคือ การจำลองสถานการณ์ปริมาณน้ำท่า และการจำลองสถานการณ์คุณภาพน้ำ (CBOD และ DO) จากผลการจำลองสถานการณ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าคือ สถานการณ์จำลองการเพิ่มพื้นที่การปลูกพืชพลังงาน 26.6% ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำท่าในแม่น้ำลดลงสูงสุดเพียง 1.08% ส่วนการจำลองสถานการณ์ของคุณภาพน้ำ ในสถานการณ์จำลองการเพิ่มพื้นที่การปลูกพืชพลังงานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำน้อยมาก แต่ในส่วนของการจำลองสถานการณ์การก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเอทานอล โดยจำลองการก่อสร้างโรงงาน 2 แห่งคือ แห่งแรกที่ช่วงระหว่างท้ายเขื่อนอุบลรัตน์จนถึงฝายหนองหวายและอีกแห่งระหว่างช่วงท้ายฝายหนองหวายจนถึงจุดบรรจบระหว่างลำน้ำพองกับลำน้ำชี ผลจากการจำลองสถานการณ์พบว่า หากมีการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเอทานอล จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินจากประเภทที่ 3 ไปเป็นประเภทที่ 4 ในฤดูแล้ง

2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแม่น้ำยม

(จเร ทองดั่ง, 2546) ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน และ ปริมาณการใช้น้ำของพืชต่อสมดุลการไหลของน้ำ และลักษณะการไหลของน้ำแม่น้ำยม โดยใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ข้อมูลน้ำฝน และปริมาณน้ำท่าของกรมชลประทาน ระหว่างปีพ.ศ. 2518 – 2541 ศึกษาลักษณะการไหลของน้ำท่า ปริมาณน้ำท่าตามช่วงฤดูกาล สมดุลน้ำท่ารายปี วันที่และช่วงเวลาการไหลของน้ำท่า ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลของน้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของแม่น้ำย่อย ปริมาณการใช้น้ำของพืชและของแต่ละลักษณะการใช้ที่ดิน โดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของปริมาณการใช้น้ำของพืชรายเดือน ของพืชแต่ละชนิดในแต่ละแม่น้ำย่อย ทำการหาค่าความสัมพันธ์โดยวิเคราะห์สมการถดถอย จากการศึกษา พบว่า พื้นที่ป่าไม้ส่วนใหญ่ของแม่น้ำได้เปลี่ยนไปเป็น สวนผลไม้ สวนผัก และที่รกร้าง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ปริมาณน้ำฝนรายปีของพื้นที่แม่น้ำย่อยตอนบนและตอนล่าง ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก มีสัดส่วน 1:1.04 ในช่วงหน้าน้ำ และสัดส่วน 1.35:1 ในช่วงหน้าแล้ง ศักยภาพการให้น้ำท่าและผลผลิตน้ำท่าของแม่น้ำตอนบนมีค่าสูงกว่าตอนล่าง ในขณะที่ปริมาณน้ำฝนแม่น้ำตอนบนมีค่าน้อยกว่า ปริมาณการใช้น้ำในแม่น้ำตอนล่างมีค่าสูงกว่าตอนบน ปริมาณการคายน้ำรายปีประเมินจากสมดุลน้ำพบว่า ค่า E_t อยู่ในอัตรา 910 – 1,020 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและน้ำฝน ต่อน้ำท่ารายปี มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญสูง แต่ยังคงมีความไม่แน่นอนในค่าสัมประสิทธิ์ของบางตัวแปร ตัวแปรน้ำฝนรายปี พื้นที่นา พืชไร่ สวนผลไม้และทุ่งหญ้าอาจเป็นตัวแปรที่สามารถพยากรณ์ หรือคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าของแม่น้ำได้

(กรมทรัพยากรน้ำ, 2548) รายงานการศึกษาโครงการจัดทำแผนรวมการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่แม่น้ำยมได้ทำการทบทวนข้อมูลผลการศึกษาด้านคุณภาพน้ำในพื้นที่แม่น้ำยมในเบื้องต้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ในพื้นที่แม่น้ำยมตอนบนส่วนใหญ่จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิว

ดินประเภท 2 ในฤดูฝนคุณภาพน้ำมีมาตรฐานต่ำกว่าในฤดูแล้ง ส่วนในพื้นที่แม่น้ำยมตอนกลางจัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 2 ทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้ง ซึ่งยังจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ดี มีระดับความรุนแรงของปัญหาเล็กน้อย และบริเวณพื้นที่แม่น้ำยมตอนกลางจัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 2-3 โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 3 ในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะบริเวณที่ไหลผ่านชุมชนเมืองขนาดใหญ่ในจังหวัดกำแพงเพชร พิจิตร พิษณุโลก แพร่ และสุโขทัย เนื่องจากมีปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และแบคทีเรียฟีคอลโคลิฟอร์มค่อนข้างสูง แต่ยังจัดว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดี แต่หากไม่มีการจัดการและมาตรการที่ดี อาจส่งผลให้คุณภาพน้ำเลวลงได้ในอนาคตเนื่องจากการขยายตัวของชุมชนเมืองและการเพิ่มของประชากร ทำให้มีการใช้น้ำและเกิดน้ำทิ้งประเภทต่างๆ เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำต่อไป

(จุฬารัตน์ เรียงสา, 2550) พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณคุณภาพน้ำในแม่น้ำยมและแม่น้ำน่าน ได้ศึกษาเรื่องคุณภาพน้ำในแม่น้ำยมระหว่างปี.ศ.2538 ถึง 2546 ซึ่งผลของแบบจำลองการแพร่กระจายแบบ 2 มิติเพื่อศึกษาคุณภาพน้ำ โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเศษเสี้ยวถ่วงน้ำหนักของกาเลอร์คินในการพัฒนาภายใต้สภาวะคงที่ พบว่าค่าบีโอดีและค่าออกซิเจนละลายน้ำของแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดภาคสนามซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

(กรมชลประทาน, 2553) ได้จัดทำโครงการแผนหลักการพัฒนาแม่น้ำยม โดยทำการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลคุณภาพน้ำผิวดิน จากการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยกรมควบคุมมลพิษ โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่าในพื้นที่แม่น้ำยมตอนบนส่วนใหญ่จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 2 ในฤดูฝนคุณภาพน้ำมีมาตรฐานต่ำกว่าในฤดูแล้ง โดยเฉพาะบริเวณอำเภอเชียงม่วน จังหวัดแพร่ ซึ่งคุณภาพน้ำในลำน้ำยมจัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 3 และพื้นที่แม่น้ำยมตอนกลางจัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 2 ทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้ง ส่วนในพื้นที่แม่น้ำยมตอนล่างจัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 2-3 โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภท 3 ในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะบริเวณที่ไหลผ่านชุมชนเมืองขนาดใหญ่ในจังหวัดกำแพงเพชร พิจิตร พิษณุโลก แพร่ และสุโขทัย จัดว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดี ซึ่งพื้นที่แม่น้ำยมทั้งตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างนั้น มีปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและแบคทีเรียฟีคอลโคลิฟอร์มมีแนวโน้มค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน

(อรพินท์ เอี่ยมสิริ, 2553) จากโครงการศึกษาความเหมาะสมและผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น โครงการพัฒนาพื้นที่พิเศษในแม่น้ำยมแบบบูรณาการ กล่าวว่าจากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำยมของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ดังนี้

1. การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษ โดยเปรียบเทียบข้อมูลย้อนหลัง 3 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 - 2551 ซึ่งมีสถานีเก็บตัวอย่างจำนวน 13 สถานี สามารถประเมินคุณภาพน้ำจากดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไป (Water Quality Index : WQI) ร่วมกับมาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดิน พบว่าในปี 2550 มีคุณภาพน้ำดีที่สุด รองลงมาคือ คุณภาพน้ำในปี 2549 และ ปี 2551 ตามลำดับ จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ทั้ง 3 ปี ซึ่งเป็นคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคและบริโภค และการเกษตร

บริเวณที่มีปัญหาคุณภาพน้ำทั้ง 3 ปี คือ บริเวณตำบลธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ดัชนีคุณภาพน้ำที่เป็นปัญหาคือ แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด แบคทีเรียฟีคอลโคลิฟอร์ม และแอมโมเนีย แสดง

ว่าในแหล่งน้ำได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์เลือดอุ่นและมนุษย์ โดยเฉพาะน้ำเสียจากชุมชน เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ในตัวเมืองจังหวัดสุโขทัย ส่วนบริเวณที่มีปัญหาคุณภาพน้ำรองลงมาคือ บริเวณอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งดัชนีคุณภาพน้ำที่เป็นปัญหาคือ ค่าออกซิเจนละลาย ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ (บีโอดี) และแอมโมเนีย แสดงให้เห็นว่าแหล่งน้ำได้รับการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์

2. การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 2 ลำปาง จากการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำยมจำนวน 10 สถานี คือ ตั้งแต่สถานี YO05 สะพานพระร่วง ตำบลธานี อำเภอมือง จังหวัดสุโขทัย ถึงสถานี YO14 สะพานแม่น้ำยม อำเภอบง จังหวัดพะเยา พบว่าบริเวณที่มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี-พอใช้ คือ แม่น้ำยมบริเวณสะพานแม่น้ำยม อำเภอบง จังหวัดพะเยา (สถานี YO14) และสะพานพัฒนาภาคเหนือ 8 บ้านน้ำโค้ง อำเภอมือง จังหวัดแพร่ (สถานี YO10) ส่วนบริเวณที่มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมเป็นส่วนใหญ่คือ แม่น้ำยมบริเวณสะพานบ้านวังหินพัฒนา ตำบลปากแคว อำเภอมือง จังหวัดสุโขทัย (สถานี YO06) คุณภาพน้ำส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม ทั้งนี้ ดัชนีคุณภาพน้ำที่เป็นปัญหาทุกสถานีคือ ความขุ่น รองลงมาคือ แเบคทีเรียฟีคอลโคลิฟอร์ม และแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด

3. การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 3 พิษณุโลก ตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำยมจำนวน 4 สถานี คือ ตั้งแต่สถานี YO01 สะพานโพทะเล อำเภอพอทะเล จังหวัดพิจิตร ถึงสถานี YO04 สะพานแม่น้ำยม เทศบาลตำบลบางระกำ อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ในปี พ.ศ. 2550 คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมมากทั้งหมด โดยดัชนีคุณภาพน้ำที่เป็นปัญหาส่วนใหญ่คือ ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ (บีโอดี) โดยที่แม่น้ำยมบริเวณสะพานโพทะเล อำเภอพอทะเล จังหวัดพิจิตร และยังมีปัญหาจากแบคทีเรียฟีคอลโคลิฟอร์ม แสดงให้เห็นว่า ปัญหาคุณภาพน้ำที่เสื่อมโทรมส่วนใหญ่เกิดจากการระบายน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะชุมชนและพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งเป็นสภาพการใช้ที่ดินที่พบบริเวณริมแม่น้ำยม โดยน้ำทิ้งดังกล่าวส่วนใหญ่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

(กรมทรัพยากรน้ำ, 2552) โครงการจัดทำแผนแม่บทแก้ไขปัญหาวิกฤติน้ำ (พื้นที่แม่น้ำยม) จากการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงระยะเวลา 11 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ.2540-2550) ตรวจวัดโดยกรมควบคุมมลพิษ ณ สถานีคุณภาพน้ำต่างๆ บนแม่น้ำยมจำนวน 13 สถานี กำหนดให้แม่น้ำยมอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ซึ่งในช่วงตอนบนของแม่น้ำคือตั้งแต่สถานี YO13 อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดพะเยา จนถึงบริเวณตอนกลางของแม่น้ำที่สถานี YO06 ตำบลปากแคว อำเภอมือง จังหวัดสุโขทัย ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำของแม่น้ำยมทั้งในส่วนของค่าดีไอและบีโอดียังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 แต่ถัดจากช่วงดังกล่าวลงมาคือ ตั้งแต่สถานี YO05 ตำบลธานี อำเภอมือง จังหวัดสุโขทัย จนถึงสถานี YO01 สะพานโพทะเล อำเภอพอทะเล จังหวัดพิจิตร พบว่าค่าเฉลี่ยของบีโอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ในขณะที่ค่าเฉลี่ยดีไอแม้ว่าจะยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดแต่ก็มีค่าต่ำกว่าในช่วงตอนบนจนถึงตอนกลางของแม่น้ำ

(สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 3 พิษณุโลก, 2554) กล่าวในรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมแม่น้ำน่านและแม่น้ำยมตอนล่าง (น่าน อุตรดิตถ์ พิษณุโลก พิจิตร) ในปี 2550 2553 และปี 2554 โดยเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงฤดูหนาว (เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม) ฤดูร้อน (เดือน

มีนาคมถึงเดือนเมษายน) และฤดูฝน (เดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม) พบว่าทั้ง 3 ปี แม่น้ำยมจัดอยู่ในแหล่งน้ำที่มีคุณภาพเสื่อมโทรม พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำมาก ได้แก่ ค่าความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ (BOD) และฟิโคลโคลิฟอร์ม โดยส่วนมากพบที่บริเวณเทศบาลตำบลโพทะเล อ.โพทะเล จ.พิจิตร นอกจากนี้ยังพบโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานในปี 2553 และปี 2554 ซึ่งได้แก่ แคดเมียม บริเวณ อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก อีกด้วย

(สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 1 ถึง 4, 2554) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มีการรายงานผลไว้ในโครงการจัดทำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่ภาคเหนือ การเฝ้าระวังและตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม แม่น้ำในภาคเหนือ แม่น้ำปิง วัง ยม น่าน และเจ้าพระยา(ตอนบน) ในปี 2550 2552 2553 2554 และปี 2555 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน จำนวน 3 ครั้ง ในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน ถึง ธันวาคม) ฤดูร้อน (มีนาคม ถึง เมษายน) และฤดูฝน(พฤษภาคม ถึง สิงหาคม)

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินในปี 2550 พบว่าทุกสถานีตรวจวัดส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5 (สามารถใช้ประโยชน์เพื่อการคมนาคม) พารามิเตอร์ที่เป็นปัญหาต่อคุณภาพน้ำแม่น้ำยม คือความสกปรกในรูปบีโอดี โดยพบว่าแม่น้ำยมช่วงที่ไหลผ่านจังหวัดพิษณุโลก และพิจิตร อยู่ในชั้นเสื่อมโทรม โดยเฉพาะที่สถานี YO02 บริเวณวัดท่าบัวทอง อ.โพธิ์ประทับช้าง จ.พิจิตร และสถานี YO03 บริเวณตำบลสามง่าม อ.สามง่าม จ.พิจิตร และคุณภาพน้ำส่วนใหญ่จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4

ปี 2552 คุณภาพน้ำของแม่น้ำยมส่วนใหญ่จัดอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมในสถานี YO01 , YO02 YO05 YO08 YO10 และ YO11 พบคุณภาพน้ำเสื่อมโทรมมากสองจุดคือ ที่บริเวณสะพานพระร่วงและสะพานวังหินพัฒนา อำเภอเมือง จ.สุโขทัย เนื่องจากพบค่าบีโอดีที่สูงเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบค่าแอมโมเนีย และค่าของโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่เกินมาตรฐานด้วย ส่วนบริเวณฝายแม่ยม อำเภอสอง จ.แพร่ พบค่าบีโอดีสูงเกินมาตรฐาน

ในปี 2553 ปี 2554 และปี 2555 พบว่าคุณภาพน้ำผิวดินโดยรวมมีแนวโน้มเสื่อมโทรมลงจาก 3 ปีก่อนที่ผ่านมา ตั้งแต่บริเวณบ้านเกยไชยเหนือ ตำบลเกยไชย อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ จนถึงบริเวณสะพานแม่น้ำยม บ้านคู ตำบลปลง อำเภอปง จังหวัดพะเยา เป็นแหล่งน้ำประเภทที่ 3 พารามิเตอร์สำคัญที่บ่งชี้ถึงปัญหาคุณภาพน้ำตลอดปี คือ BOD FCB และ NH_3 และจากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานฯ พบแคดเมียม (Cd) โดยพบที่ อ.บางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

(สุภัทรา กิติชูชยฤทธิ, 2556) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (land-use change) ในพื้นที่แม่น้ำยมระหว่างปี พ.ศ.2531-2552 พบว่าพื้นที่ป่าในปีพ.ศ. 2531เปลี่ยนไปเป็นพื้นที่พืชไร่ ในปีพ.ศ. 2552 มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 3.7 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่ป่าที่เปลี่ยนเป็นพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด (นาข้าว พืชไร่ ไม้ยืนต้น) คิดเป็นร้อยละร้อยละ 5.67 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่เมืองมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจากพื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตรกรรม(นาข้าว พืชไร่ ไม้ยืนต้น) ในปี พ.ศ. 2531 ไปเป็นพื้นที่เมืองในปี พ.ศ. 2552 คิดเป็นร้อยละ 2.26 ของพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด โดยส่วนใหญ่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดบริเวณด้านล่างของพื้นที่ ซึ่งพื้นที่บริเวณแม่น้ำยมตอนล่างมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มนั้นได้กลายเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและเกิดการขยายตัวของพื้นที่เมือง(พื้นที่อยู่อาศัย และโรงงานอุตสาหกรรม) อย่างต่อเนื่องในทุกๆปี