

การศึกษาความสามารถในการรองรับความเป็นกรดโดยการประยุกต์ใช้ The First-order Acidity  
Balance Model : กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
สิงหาคม 2560

การศึกษาความสามารถในการรองรับความเป็นกรดโดยการประยุกต์ใช้ The First-order Acidity  
Balance Model : กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
สิงหาคม 2560  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาความสามารถในการรองรับความเป็นกรดโดยการประยุกต์ใช้ The First-order Acidity  
Balance Model : กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี




เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
สิงหาคม 2560

จุฑารัตน์ เสียมวงษ์. (2560). การศึกษาความสามารถในการรองรับความเป็นกรดโดยการประยุกต์ใช้ *The First-order Acidity Balance Model* : กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์: อาจารย์ ดร.ศุภิกา วาณิชชัง.

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) เป็นสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างไรขึ้นอยู่กับความสามารถของระบบนิเวศในการปรับสมดุลของระบบนิเวศ ดังนั้นจำเป็นต้องรู้ถึงศักยภาพตามธรรมชาติของระบบนิเวศแหล่งน้ำผิวดินในการรองรับกรดด้วยการประเมินความสามารถในการรองรับกรด (Critical load) งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินค่า critical load ของกรดของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี ด้วยวิธี *The First-order acidity balance (FAB) model* ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยสมการสมดุลประจุระหว่างแหล่งก่อและแหล่งรองรับซัลเฟอร์และไนโตรเจนภายใต้สภาวะสมดุล แหล่งก่อมลพิษได้แก่ การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ส่วนแหล่งรองรับมลพิษ ประกอบด้วย ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต, Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ, ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซัลเฟอร์และไนโตรเจนที่ถูกกักเก็บโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในตะกอนดิน และ base cation การคำนวณโดย FAB model ต้องการข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อมูลอุทกวิทยา ข้อมูลคุณภาพน้ำ และข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นต้น ซึ่งการศึกษานี้ สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ข้อมูลโดยตรง (direct data) ได้แก่ พื้นที่ลุ่มน้ำ, พื้นที่ป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ, พื้นที่แหล่งน้ำผิวดิน, การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ( $S_{dep}$ ,  $N_{dep}$ ) และ 2) ข้อมูลโดยอ้อม (indirect data) ได้แก่ น้ำท่ารายปี ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ), ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรม ( $[BC]_0$ ) พบว่า ค่าเฉลี่ยการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน เท่ากับ 121.96 และ 85.09 eq/ha/yr ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนในเขตกรุงเทพฯ ถึง 4 เท่า ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 470 และ 380 eq/ha/yr ตามลำดับ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ การศึกษานี้จึงใช้ Acid Neutralization Capacity limit ( $ANC_{limit}$ ) ที่  $20 \mu\text{eq l}^{-1}$  จากข้อมูล อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์มีความสามารถในการรองรับซัลเฟอร์และไนโตรเจนได้เท่ากับ 6.637 keq/ha/yr ซึ่ง การดูดซึมไนโตรเจนของพืชเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการรองรับการตกสะสมของกรดได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การติดตามข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จำเป็นสำหรับการคำนวณเพื่อจัดทำแผนที่ critical load ของกรด สำหรับประเทศไทย

STUDY OF A CRITICAL LOAD FOR ACIDITY USING A FIRST-ORDER ACIDITY  
BALANCE MODEL: A CASE STUDY OF VAJIRALONGKORN RESERVOIR IN  
KANCHANABURI PROVINCE



ABSTRACT  
BY  
JUTHARAT SANGIAMWONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Science Degree in Environmental Technology and Resources Management  
at Srinakharinwirot University  
August 2017

Jutharat Sangiamwong. (2017). *Study of a Critical Load for Acidity using a First-Order Acidity Balance Model: A Case Study of Vajiralongkorn Reservoir in Kanchanaburi Province*. Masters thesis, M.Sc. (Environmental Technology and Resources Management). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Supika Vanitchung.

Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) are important acid-forming compounds, which occur during the combustion of fossil fuels. The emissions of acid-forming compounds has significantly increased and the effects of sulfur and nitrogen deposits on the ecosystem depends on the capacity of the ecosystem to balance itself. The aquatic ecosystem is one important ecosystem receptor; therefore, it is necessary to understand the natural potential of ecosystems to balance the critical load for acid deposition. This study estimates the critical load (CL) of acidity for Vajiralongkorn reservoir by the first-order acidity balance (FAB) model, which bases its calculation on the steady state mass balance between sinks and sources of sulfur and nitrogen. The sources include sulfur and nitrogen deposition. The sinks include nitrogen uptake, nitrogen immobilization, nitrogen denitrification, sulfur and nitrogen retention by microorganisms in sediment and base cations. The FAB model is a method which requires data on many aspects, such as hydrological data, water quality data and forests in terms of catchment area data. The data required for calculation can be classified into two groups: direct and indirect data. Direct data is that which can be collected directly from sources of information. These include catchment area, forest in the catchment area, lake area and sulphur and nitrogen depositions. The indirect data are the estimated values, annual run-off, sulfur and nitrogen uptakes, and base cation concentrations at a pre-industrial rate. The annual averages of sulfur and nitrogen depositions were 121.96 and 85.09 eq ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>, respectively. The deposition monitoring amount in Kanchanaburi was fair times lower compared with Bangkok, in which the average sulfur and nitrogen depositions were approximately 470 and 380 eq ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>, respectively. To ensure no damage to fish, a value for acid neutralizing capacity (ANC) limit of 20 µeq l<sup>-1</sup> was used to calculate CL, with its uncertainty range of 0-50 µeq l<sup>-1</sup>. Depending on the input data and their uncertainty, the critical load of acidity (sulfur and nitrogen) in the Vajiralongkorn reservoir was 6.637 keq ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>. Among the parameters used to calculate, nitrogen uptake had the most influence on critical load value. Moreover, more accurate and routine monitoring data are required for the calculation in terms of mapping the critical load for acidity in Thailand.

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสามารถในการรองรับความเป็นกรดโดยการประยุกต์ใช้ The First-order Acidity

Balance Model : กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี

ของ

จุฑารัตน์ เสงี่ยมวงษ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

วันที่..... เดือน..... พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.ศุภิกา วานิชชัง)

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทน์ งามนิยม)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศุภิกา วานิชชัง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บัญญัติ ใจลำนันท์)

## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.ศุภิกา วาณิช ชัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และช่วยแก้ไขปัญหาล่างต่าง ๆ ในช่วงดำเนินการวิจัย รวมถึงการตรวจแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทน์ งามนิยม ประธานกรรมการสอบปริญญาโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.บัญญัติ ใจลาพันธ์ กรรมการสอบปริญญาโท ที่กรุณาชี้แนะและช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายเทวินทร์ มีทรัพย์ หัวหน้าอุทยานแห่งชาติเขาแหลม ที่กรุณาให้ความร่วมมือในการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างพืชที่บริเวณพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาแหลม

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช และเขื่อนวชิราลงกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญาโทจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว รวมถึงเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่าง ตั้งแต่เริ่มทำปริญญาโทจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

จุฑารัตน์ เสงี่ยมวงษ์

# สารบัญ

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| 1 บทนำ.....   | 1    |
| ความมุ่งหมายของการศึกษา.....  | 2    |
| ความสำคัญของการศึกษา.....   | 2    |
| ขอบเขตการศึกษา.....   | 3    |
| นิยามศัพท์เฉพาะ.....  | 3    |
| กรอบแนวคิดในการวิจัย.....   | 4    |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 5    |
| การตกสะสมของกรด (Acid Deposition) .....   | 5    |
| แหล่งที่มาของการเกิดการตกสะสมของกรดในบรรยากาศ.....  | 5    |
| สารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการตกสะสม.....   | 5    |
| ประเภทของการตกสะสมของสารกรด.....  | 8    |
| Critical load.....  | 9    |
| ความหมายของ critical load.....  | 9    |
| หลักการประเมินค่า critical load ของแหล่งน้ำผิวดิน (surface water)....                       | 11   |
| หลักการคำนวณค่าcritical load โดยวิธี Steady state water chemistry<br>model.....             | 12   |
| หลักการคำนวณค่าcritical load โดยวิธี The First-order acidity<br>balance model.....          | 13   |
| พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการคำนวณค่า critical load ด้วยวิธี SSWC<br>model และ FAB model ..... | 15   |
| การตกสะสมของซัลเฟอร์ (Sulfur deposition; $S_{dep}$ ).....                                   | 15   |
| การตกสะสมของไนโตรเจน (Nitrogen deposition; $N_{dep}$ ).....                                 | 16   |
| Base Cation (BC).....   | 16   |
| Acid Neutralization Capacity (ANC).....   | 20   |
| การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ (Sulfur retention; $S_{ret}$ ).....                            | 23   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่   | หน้า      |
|---|-----------|
| <b>2 (ต่อ)</b>  |           |
| การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ (Nitrogen retention; $N_{ret}$ ).....                                  | 25        |
| ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต (Nitrogen uptake; $N_{upt}$ )..                        | 27        |
| ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification ( $N_{de}$ ).....                                  | 27        |
| กระบวนการ Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่ม ( $N_i$ ).....                           | 28        |
| ข้อมูลทั่วไปของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ.....   | 30        |
| การใช้ประโยชน์เขื่อนวชิราลงกรณ.....   | 30        |
| พื้นที่ลุ่มน้ำอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ.....  | 31        |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 32        |
| <b>3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>  | <b>34</b> |
| พื้นที่ศึกษา.....   | 34        |
| กรอบการศึกษา.....   | 38        |
| การศึกษาและการประเมินพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณค่า critical load....                                 | 40        |
| การประเมินค่าความเข้มข้นของ base cation ก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ).....    | 40        |
| Acid Neutralization Capacity limit ( $ANC_{limit}$ ).....   | 41        |
| น้ำท่ารายปี (Q).....  | 42        |
| การตกสะสมของซัลเฟตที่ซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเลและการตกสะสมของไนโตรเจน ( $S_{dep}^*$ , $N_{dep}$ )..... | 42        |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_S$ ).....  | 43        |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ ) .....   | 43        |
| ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ).....                                     | 43        |
| Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ ( $N_i$ ).....                                  | 46        |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่   | หน้า       |
|---|------------|
| <b>4 ผลการศึกษา.....</b>                                      | <b>47</b>  |
| การประเมินพารามิเตอร์ในการคำนวณความสามารถในการรองรับกรด.....  | 47         |
| ข้อมูลโดยตรง (direct data).....                               | 47         |
| ข้อมูลโดยอ้อม (indirect data).....                            | 53         |
| การประเมินค่า critical load.....                              | 64         |
| การตรวจสอบค่าความอ่อนไหวของค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์..... | 66         |
| <b>5 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา.....</b>                        | <b>68</b>  |
| ข้อเสนอแนะ.....   | 70         |
| <b>บรรณานุกรม.....</b>  | <b>72</b>  |
| <b>ภาคผนวก.....</b>   | <b>78</b>  |
| ภาคผนวก ก .....   | 79         |
| ภาคผนวก ข .....   | 81         |
| ภาคผนวก ค .....   | 86         |
| <b>ประวัติย่อผู้วิจัย.....</b>                                | <b>102</b> |

## บัญชีตาราง

| ตาราง  | หน้า |
|--|------|
| 1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของซัลเฟตช่วงก่อน<br>อุตสาหกรรมที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลที่ได้จากการทดลอง(N คือ จำนวน<br>ตัวอย่าง และ r คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์)..... | 19   |
| 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $S_s$ ) ที่ประมาณได้จากการเปรียบเทียบอัตราการ<br>กำจัดซัลเฟตทั้ง 3 วิธีกับความเข้มข้นของซัลเฟตในแหล่งน้ำ.....  | 25   |
| 3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนโตรเจน ( $S_N$ ) ในทะเลสาบต่างๆ.....  | 27   |
| 4 ค่า Nitrogen immobilization สำหรับดินประเภทต่างๆ.....  | 28   |
| 5 ปริมาณการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนแบบเปียกและแบบแห้งใน<br>ปี พ.ศ. 2543 – 2557.....  | 49   |
| 6 ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ. 2528 – 2558.....  | 51   |
| 7 ปริมาณไนโตรเจนในลำต้นและกิ่งของพืชแต่ละชนิด.....   | 52   |
| 8 มวลชีวภาพของป่าเบญจพรรณในพื้นที่ป่าทองผาภูมิ (โปรงพุ่ม).....   | 55   |
| 9 การประมาณค่า Nitrogen uptake ของพืชแต่ละชนิด.....  | 55   |
| 10 ความเข้มข้นของ base cation และ acid anion ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ<br>ปี พ.ศ. 2558.....  | 59   |
| 11 ความเข้มข้นของ $Ca^{2+}$ $Mg^{2+}$ $Na^+$ $K^+$ $SO_4^{2-}$ และ $BC_i$ ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล<br>ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี พ.ศ. 2558.....                                     | 60   |
| 12 ความเข้มข้นของ $SO_4^{2-}$ ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ของ<br>อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี 2558.....   | 62   |
| 13 ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล<br>ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี 2558.....  | 63   |
| 14 ค่าที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณค่า<br>critical load.....  | 66   |
| 15 การตรวจสอบความอ่อนไหวของค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์.....  | 67   |

## บัญชีตาราง (ต่อ)

| ตาราง |   | หน้า |
|-------|---|------|
| 16    | ค่าที่ได้จากคำนวณของพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการประเมินค่า Critical load..... | 69   |
| 17    | ค่า critical load ของกรด ในแหล่งน้ำผิวดินประเทศต่างๆ.....                   | 70   |



## บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| 1 กรอบแนวคิดในการศึกษา.....   | 4    |
| 2 วัฏจักรซัลเฟอร์.....  | 6    |
| 3 วัฏจักรไนโตรเจน.....  | 8    |
| 4 กลไกการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศสู่พื้นโลก.....   | 9    |
| 5 เปรียบเทียบระหว่าง critical load และ target load.....   | 10   |
| 6 ค่าโอกาสสะสม(Cumulative distribution functions) ของ F-factors สำหรับ<br>ทะเลสาบใน Finland (ทะเลสาบ 1,450 แห่ง) Norway (ทะเลสาบ 2,305 แห่ง)<br>และ Sweden (ทะเลสาบ 760 แห่ง).....                    | 20   |
| 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ANC และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับประชากร<br>ของปลา Atlantic Salmon.....  | 23   |
| 8 ขอบเขตลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำแมกลอง.....   | 35   |
| 9 พื้นที่ศึกษา.....   | 36   |
| 10 ประเภททรัพยากรป่าไม้ในลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและห้วยปิลอก.....   | 37   |
| 11 กรอบการศึกษา.....  | 39   |
| 12 เส้นทางเก็บตัวอย่างพีช : ประดู่ป่า แดง และตะคร้อ.....  | 45   |
| 13 จุดเก็บตัวอย่างของพีชแต่ละชนิด : (ก) ต้นแดง, (ข) ตะคร้อ, (ค) ประดู่ป่า.....  | 45   |
| 14 วิธีการเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนของพีช : (ก) เนื้อไม้บริเวณลำต้น, (ข) กิ่ง.....   | 46   |
| 15 พื้นที่ป่าในลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอก.....  | 47   |
| 16 จุดตรวจวัดการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน บริเวณเขื่อนวชิราลงกรณ.....  | 48   |
| 17 ตัวอย่างชิ้นส่วนของพีช : (ก) เนื้อไม้บริเวณลำต้นของแดง, (ข) กิ่งของแดง,<br>(ค) เนื้อไม้บริเวณลำต้นของประดู่ป่า, (ง) กิ่งของประดู่ป่า, (จ) เนื้อไม้บริเวณ<br>ลำต้นของตะคร้อ, (ฉ) กิ่งของตะคร้อ..... | 54   |
| 18 จุดตรวจวัดความเข้มข้นของ base cation และ acid anion.....   | 58   |
| 19 กราฟแนวโน้มความเข้มข้นของ base cation ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล<br>( $[BC]_i^+$ ) ในเวลาต่างๆ.....  | 61   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### ภูมิหลัง

การพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ ส่งผลให้เกิดเป็นปัญหามลพิษต่างๆ ตามมาอย่างมาก มลพิษทางอากาศถือเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีสาเหตุจากความต้องการในการบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มสูงขึ้นในทุกภาคส่วน ทั้ง อุตสาหกรรมและการขนส่ง จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งส่วนหนึ่งทำให้เกิดการปล่อย ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SOx) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) สู่บรรยากาศ โดยก๊าซทั้งสองกลุ่มนี้นับเป็นมลพิษไร้พรมแดน (Transboundary pollution) เนื่องจากเมื่อก๊าซดังกล่าวลอยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศจะจับตัวกับฝุ่นละอองที่อยู่ในอากาศและสามารถถูกพัดพาไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อยู่ในอากาศจะกลายเป็นกรดเข้มข้น เกิดการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศ (Atmospheric acid deposition) ทั้งนี้อาจจะเกิดขึ้นห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นหลายร้อยกิโลเมตร (กรมควบคุมมลพิษ. 2558) ดังนั้นปัญหาการตกสะสมของกรด (Acid Deposition) จึงเป็นปัญหาในระดับประเทศและระดับภูมิภาค ดังนั้นนอกจากประเทศไทยจะได้รับ ผลกระทบจากการตกสะสมของกรดจากแหล่งกำเนิดภายในประเทศแล้ว ยังอาจ รวมถึงที่แพร่กระจายมาจากประเทศอื่นๆ ในภูมิภาคได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้หลายประเทศในภูมิภาคมีการตระหนักถึงปัญหาการตกสะสมของกรด โดยในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีการร่วมกลุ่มกันของประเทศ จีน อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ มาเลเซีย มองโกเลีย ฟิลิปปินส์ รัสเซีย เวียดนาม กัมพูชา และไทย จัดตั้งเป็นเครือข่ายในการติดตามตรวจวัดการตกสะสมฝนกรดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเข้าใจร่วมกันถึงสถานภาพของการตกสะสมของกรด และนำข้อมูลที่ได้ไปวางแผนเพื่อป้องกันและบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากปัญหาดังกล่าว (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. 2558)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมในอัตราที่สูงกว่าในอดีตมาก ปัญหาการตกสะสมของกรดจึงถือเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ โดยอดีตปัญหาเหล่านี้ยังไม่รุนแรงมากนักและยังอยู่ในวิสัยที่ระบบนิเวศจะสามารถปรับสมดุลของตัวเองได้ เนื่องจากตามธรรมชาติแล้วระบบนิเวศต่างๆ มีความสามารถในการปรับสภาพตัวเองโดยอาศัยองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในระบบนิเวศ ทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตช่วยในการปรับสภาพให้กลับสู่สภาวะสมดุล แต่ในอนาคตหากปัญหาเหล่านี้ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นย่อมทำให้ระบบนิเวศซึ่งเป็นแหล่งรองรับมลพิษไม่สามารถปรับสมดุลได้ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ตามมา

อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งนี้การตกสะสมของกรดถือเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระบบนิเวศ ซึ่งมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ทั้ง สัตว์ พืช และการใช้ประโยชน์ของมนุษย์

แหล่งน้ำผิวดิน เป็นแหล่งรองรับการตกสะสมของกรดที่สำคัญอย่างหนึ่ง ถ้ามีการตกสะสมของกรดเหล่านี้สู่แหล่งน้ำผิวดินในปริมาณมากจะทำให้ระบบนิเวศเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปลา สาหร่าย สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศ ทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากนี้ยังอาจมีผลกระทบต่อประชาชนที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำผิวดินเพื่อการประกอบอาชีพ ดังนั้นการศึกษาความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดิน จึงเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อการวางแผนและหาทางป้องกัน การปลดปล่อยมลพิษที่เกินศักยภาพของระบบนิเวศในการรองรับ เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

การประเมินความสามารถในการรองรับกรด (critical load of acid) จะทำให้ทราบว่าระบบนิเวศที่ศึกษานั้น สามารถรองรับปริมาณกรดได้เท่าไรที่จะไม่ทำให้ระบบนิเวศเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และค่า critical load นี้ จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวางนโยบายการควบคุมมลพิษทางอากาศ และยังสามารถนำมาใช้ในการวางมาตรการป้องกันอันตรายและบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสภาวะความเป็นกรดของแหล่งน้ำผิวดิน

### ความมุ่งหมายของการศึกษา

1. ศึกษาแนวทางในการประเมินความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดินที่เหมาะสมในกรณีการมีข้อมูลที่จำกัด
2. วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการประเมินความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดินและประเมินความสามารถในการรองรับกรดในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ

### ความสำคัญของการศึกษา

เนื่องจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณมีความสำคัญทั้งในแง่การเกษตร การประมง และการผลิตไฟฟ้า ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จะทำให้ทราบขีดความสามารถในการรองรับกรดในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการวางนโยบายการควบคุมการปล่อยมลพิษทางอากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเป็นกรด อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการประเมินค่าความสามารถในการ

รองรับกรดกรณีที่มีข้อมูลจำกัด และใช้เป็นแนวทางในรวบรวมข้อมูลและการประเมินค่าความสามารถในการรองรับกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดินอื่นๆ ในประเทศไทย

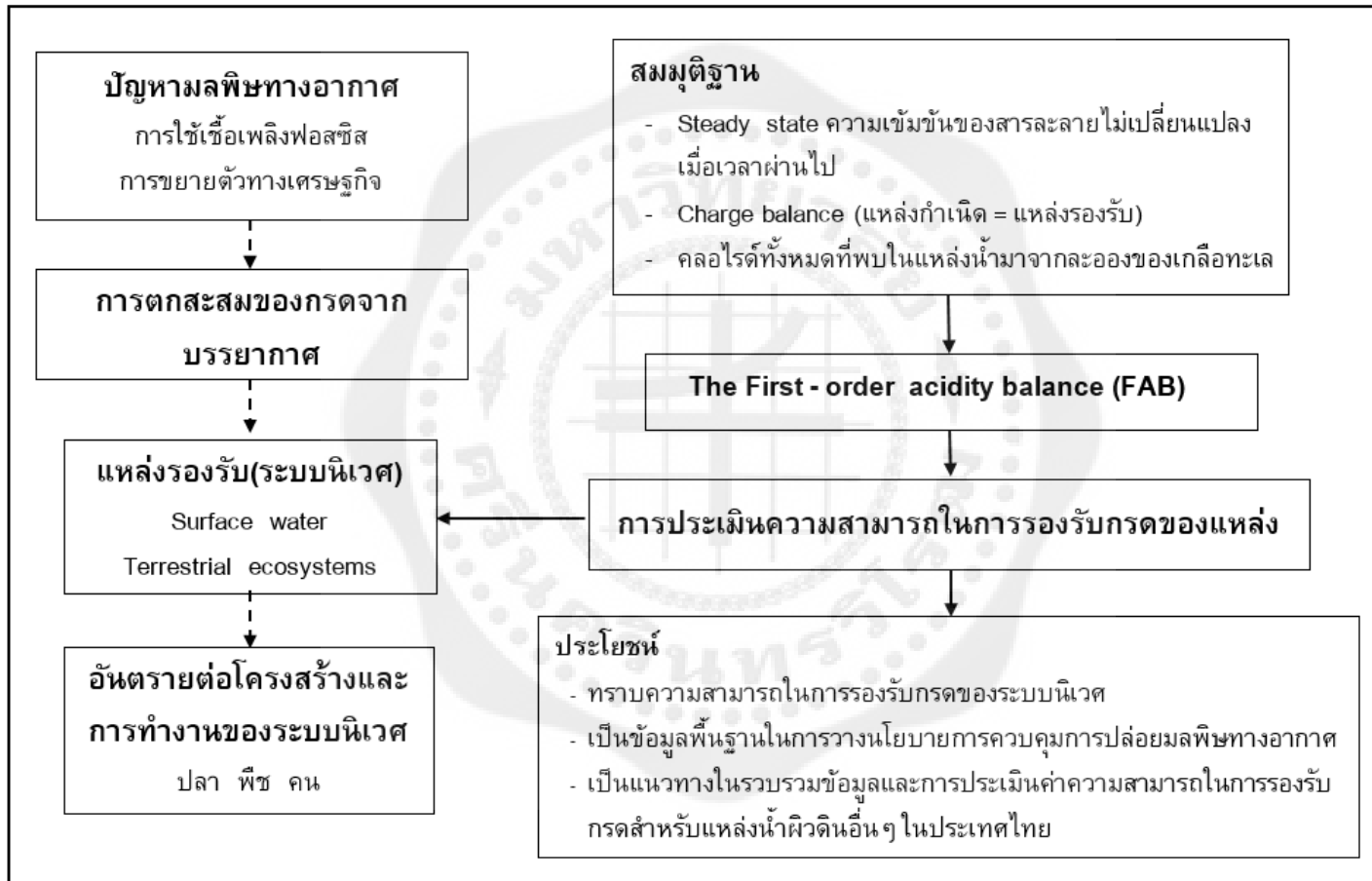
### ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้การประเมินความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดินด้วยวิธี The First-order acidity balance (FAB) model ซึ่งอาศัยหลักการสมดุลประจุ (Charge balance) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะคงที่ (steady state)
2. การตกสะสมของกรดในการศึกษานี้ พิจารณาที่ การตกสะสมของออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>)
3. แหล่งน้ำผิวดินในการศึกษาความสามารถในการรองรับกรด ได้แก่ อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอก

### นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การประเมินความสามารถในการรองรับกรด หมายถึง การคาดการณ์ปริมาณของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ที่ระบบนิเวศได้รับในปริมาณมากที่สุด ซึ่งต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อดัชนีชีวภาพ (Biological indicator) ของระบบนิเวศ
2. การตกสะสมของกรด หมายถึง การเคลื่อนย้ายสารกรดจากบรรยากาศสู่พื้นโลกโดยผ่านทางกระบวนการ 2 แบบ ได้แก่ การตกสะสมแบบเปียกที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ และการตกสะสมแบบแห้งที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ
3. ระบบนิเวศ หมายถึง ระบบความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ร่วมกันในบริเวณนั้น และความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มสิ่งมีชีวิตกับสภาพแวดล้อมของแหล่งที่อยู่ ได้แก่ ดิน น้ำ แสง
4. ลุ่มน้ำ หมายถึง บริเวณพื้นที่ทั้งหมดที่โอบล้อมแม่น้ำเมื่อน้ำฝนที่ตกลงมาในบริเวณพื้นที่แล้วจะระบายลงสู่ลำห้วย ลำคลองต่างๆ จนในที่สุดไหลออกสู่จุดสุดท้ายที่กำหนดเป็นปากแม่น้ำของลุ่มน้ำนั้น โดยพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดจะถูกแบ่งด้วยสันปันน้ำ
5. Base cation หมายถึง ไอออนประจุบวก ได้แก่ Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> Na<sup>+</sup> และ K<sup>+</sup> ที่อยู่ในน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของน้ำในการสะเทินกรดเพื่อไม่ให้แหล่งน้ำเกิดสภาพกรด (Acidification)
6. Acid Neutralizing Capacity (ANC) หมายถึง ความสามารถของน้ำในแหล่งน้ำตามธรรมชาติในการสะเทินกรดแก่ ดังนั้น ANC จึงเป็นความแตกต่างระหว่าง เบสแก่แบบประจุบวก (base cation) และกรดแก่แบบประจุลบ (acid anion) ของน้ำในการยับยั้งไม่ให้น้ำเกิดความเป็นกรด

## กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### การตกสะสมของกรด (Acid Deposition)

##### 1. แหล่งที่มาของการเกิดการตกสะสมของกรดในบรรยากาศ

สารมลพิษที่เป็นตัวการทำให้เกิดกรดในบรรยากาศ (Acid Precursors) ที่สำคัญมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ 1) สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SOx) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) 2) สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ซึ่งรวมถึงไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) แหล่งที่มาของสารมลพิษเหล่านี้ มีทั้งที่มาจากแหล่งธรรมชาติ (Natural Sources) และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ (Anthropogenic Sources) (พูลสุข โพรธิรักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 58)

1.1 แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ สารมลพิษในบรรยากาศที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่าตามธรรมชาติ การเผาเปื้อนและการย่อยสลายของซากพืช สัตว์ และของสารอินทรีย์ ประเภทต่างๆ เป็นต้น โดยแหล่งกำเนิดมลพิษที่มาจากธรรมชาติจะมีบทบาทความสำคัญต่อการตกสะสมของกรดน้อยกว่าแหล่งที่มนุษย์สร้าง (โกวิทย์ สุวรรณหงส์. 2545: 19)

1.1 แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้าง สารมลพิษในบรรยากาศเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทต่างๆ ในโรงไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงาน การเผาถ่านหินและน้ำมันเตาในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม การเผาขยะ และการเผาน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเจ็ท ในยานพาหนะประเภทต่างๆ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก รถโดยสารประจำทาง รถไฟ เรือ และเครื่องบิน เป็นต้น (พูลสุข โพรธิรักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 58) โดยก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศส่วนใหญ่จะมาจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นหลัก (โกวิทย์ สุวรรณหงส์. 2545: 5-6)

##### 2. สารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการตกสะสม

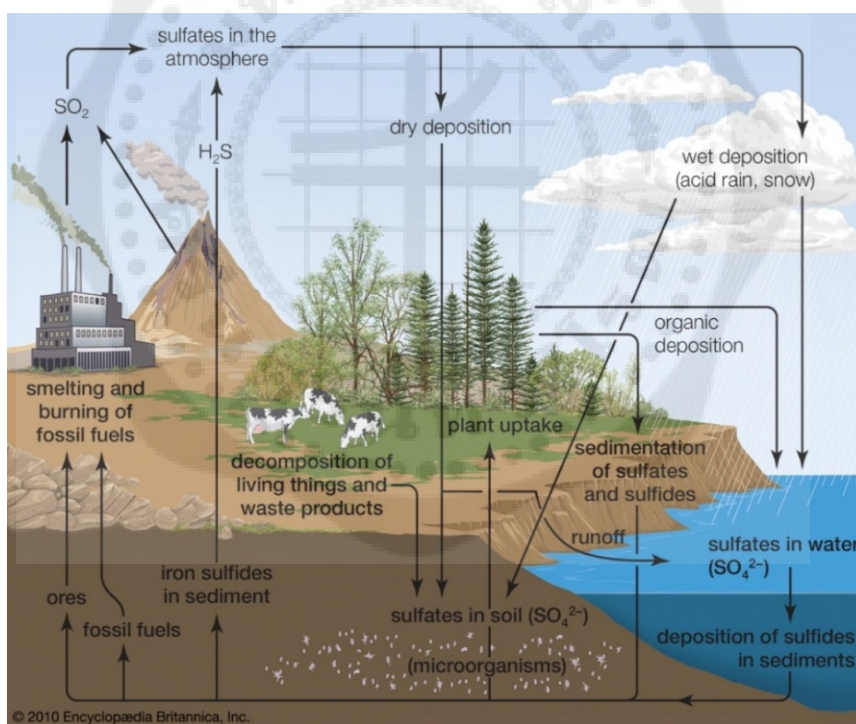
2.1 สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์ ที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ประมาณ 70% และแหล่งธรรมชาติประมาณ 30% สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์ในธรรมชาติที่พบมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดยวัฏจักรของการเปลี่ยนรูปของซัลเฟอร์พบได้ทั่วไปในดิน น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิต (พูลสุข โพรธิรักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 56)

ซัลเฟอร์ที่พบในบรรยากาศอยู่ในรูปของสารประกอบ 3 ชนิด คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) และ ซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ในรูปของละออง (Aerosol) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง 3 สารนี้ SO<sub>2</sub> มีความสำคัญที่สุด (โกวิทย์ สุวรรณหงส์. 2545: 10) เนื่องจากซัลเฟอร์ส่วนใหญ่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมักจะถูกปลดปล่อยมาในรูปของ ซัลเฟอร์

ไดออกไซด์ และเมื่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อยู่ในอากาศทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และเมื่อทำปฏิกิริยาต่อกับน้ำหรือละอองน้ำในอากาศจะได้เป็นกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ดังสมการที่ (1) และ (2) แล้วถูกชะตกลงมาเป็นฝนกรด (พูลสุข โปธิรักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 56-57) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นกรดซัลฟิวริกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความชื้นในอากาศมากกว่า 70% (มลิวรรณ บุญเสนอ. 2552: 237)



โดยปกติก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสีแต่มีรส เมื่อระดับความเข้มข้นมากพอจะมีกลิ่นฉุน มีจุดเดือด  $-10$  องศาเซลเซียส ละลายน้ำได้ดีและเกิดเป็นกรด โดยทั่วไปจะพบในบรรยากาศประมาณ  $0.02 - 0.1$  ppm (ผลิกา รอดประดิษฐ์. 2551: 5) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่ออยู่รวมกับสารที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็กและโซเดียม เกิดปฏิกิริยาการเติมอากาศเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก (นิศาชล ประดับ. 2549: 7)



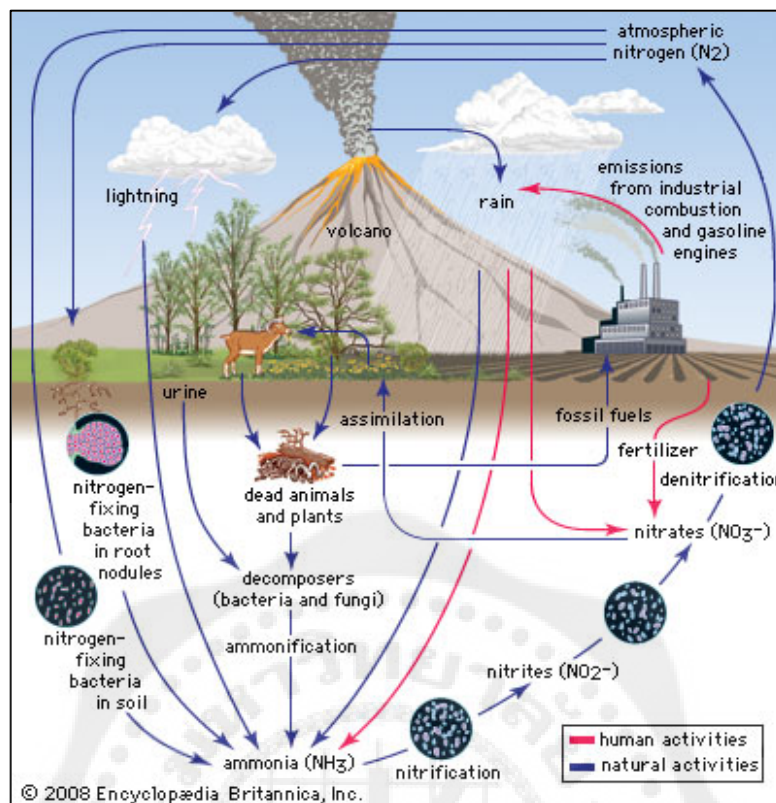
ภาพประกอบ 2 วัฏจักรซัลเฟอร์

ที่มา: Encyclopædia Britannica. (2560). Chemistry of Acid Deposition.

2.2 สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ในบรรยากาศจะพบก๊าซไนโตรเจนถึง 78% ซึ่งออกไซด์ของไนโตรเจนที่พบทั่วไปในบรรยากาศได้แก่ ไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) , ไนตริกออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) และไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) แต่ที่มีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดมลพิษทางอากาศและมีความเกี่ยวข้องกัน ได้แก่ ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ (พุลสุข โพธิ์รักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 52-53) เนื่องจากการปลดปล่อยสู่บรรยากาศโดยกิจกรรมของมนุษย์เป็นปริมาณมาก โดยวัฏจักรการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน แสดงดังภาพประกอบ 3 ไนตรัสออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสีไม่มีกลิ่น และละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย ส่วนก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์จะมีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งไนตรัสออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิปกติไนโตรเจนกับออกซิเจนจะไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกัน โดยไนตรัสออกไซด์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส (นิศาชล ประดับ. 2549: 7) และไนโตรเจนไดออกไซด์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,210 – 1,765 องศาเซลเซียส (พุลสุข โพธิ์รักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 52-55)

ไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจะสามารถอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 4-5 วัน เท่านั้น ก็จะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนหรือโอโซนในบรรยากาศ เกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้ดีและจะรวมตัวกับละอองน้ำหรือน้ำฝนเกิดเป็นกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ดังสมการที่ (3) และ (4)





ภาพประกอบ 3 วัฏจักรไนโตรเจน

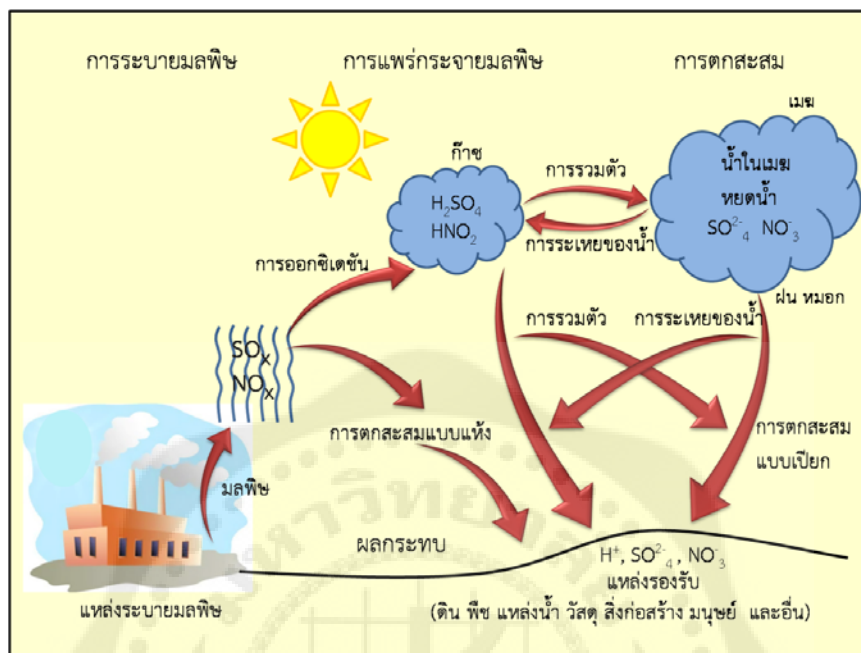
ที่มา: Encyclopædia Britannica. (2560). Chemistry of Acid Deposition

### 3. ประเภทของการตกสะสมของสารกรด

กระบวนการตกสะสมของกรด เป็นกระบวนการที่มลพิษในบรรยากาศทั้งในรูปของก๊าซหรืออนุภาคของละอองขนาดเล็ก ที่ตกและสะสมลงสู่พื้นโลก (Henning Rodhe; & Rafael Herrera. 1988: 17) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดกรดและการตกสะสมลงสู่พื้นโลกจะเกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ สารมลพิษที่ก่อให้เกิดกรด คือ สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์และออกไซด์ของไนโตรเจน โดยการตกสะสมของกรดที่เกิดขึ้นจะเป็นวัฏจักร ดังภาพประกอบ 4 กระบวนการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศ (Atmospheric acid deposition) มีรูปแบบการตกสะสม 2 รูปแบบ คือ การตกสะสมแบบแห้ง (Dry deposition) และ การตกสะสมแบบเปียก (Wet deposition)

3.1 การตกสะสมแบบแห้ง คือ การที่ก๊าซและอนุภาคต่างๆ ของสาร เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรืออนุภาคซัลเฟต เคลื่อนย้ายจากบรรยากาศลงสู่พื้นโลก เป็นการตกสะสมของกรดในสถานะที่ไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ โดยกรดที่แขวนลอยในบรรยากาศจะถูกพัดไปกับลม และตก

สะสมบนผิวดิน แหล่งน้ำผิวดินและสิ่งก่อสร้าง การตกสะสมรูปแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ผลึกา รอดประดิษฐ์. 2551: 10)



ภาพประกอบ 4 กลไกการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศสู่พื้นโลก

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ. (2558). สารกรดในบรรยากาศ:มลพิษไร้พรมแดน

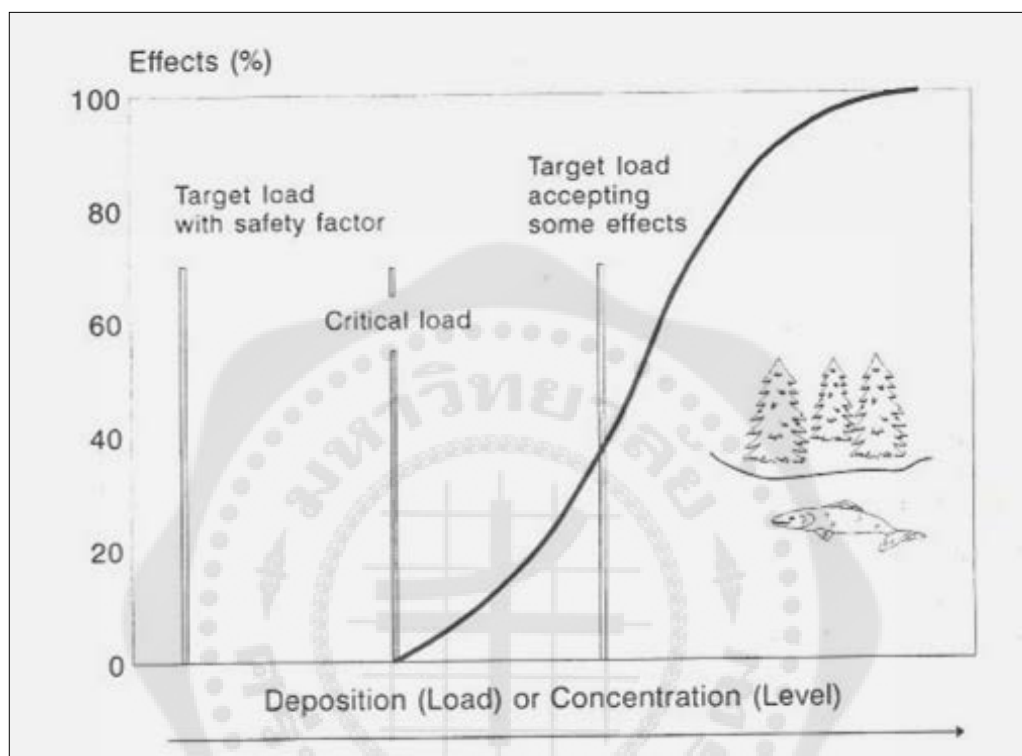
3.2 การตกสะสมแบบเปียก คือ กระบวนการเคลื่อนย้ายของก๊าซและอนุภาคต่างๆ ของสาร ที่เกิดการรวมตัวกับน้ำฝน หิมะ น้ำค้าง หมอก หรือน้ำในรูปแบบอื่นๆ แล้วตกลงสู่พื้นโลก หรือเป็น กระบวนการเปลี่ยนแปลงของก๊าซ, ของเหลวและของแข็งจากบรรยากาศ ลงสู่พื้นโลกในระหว่างเกิดฝนตก โดยทั่วไปจะปรากฏในรูปฝนกรดที่มีสาเหตุมาจากกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก (โกวิทย์ สุวรรณหงส์. 2545: 16)

## Critical load

### 1. ความหมายของ critical load

Arne Henriksen. 1998 ให้นิยามของ critical load คือ “การคาดการณ์ปริมาณของสารมลพิษหนึ่งชนิดหรือมากกว่า ที่ระบบนิเวศได้รับในปริมาณมากที่สุด ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อดัชนีชีวภาพ (Biological indicator) ของระบบนิเวศ” ในทำนองเดียวกัน Dupont J; et al. 2005 ให้นิยามคือ “ปริมาณการสะสมของสารมลพิษที่มากที่สุด

ที่จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่นำไปสู่ผลกระทบระยะยาวซึ่งเป็นอันตรายต่อโครงสร้างและการทำงานของระบบนิเวศ” โดยดัชนีชี้วัดภาพของระบบนิเวศ หมายถึง สิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ เช่น ปลา พืช และ คน เป็นต้น ดังนั้นระบบนิเวศที่มีค่า critical load สูง จึงเป็นระบบนิเวศที่มีความสมดุลสูง ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 เปรียบเทียบระหว่าง critical load และ target load

ที่มา : C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. (1992). Acidification of Freshwater Ecosystems Implications for the Future. หน้า 22

จุดมุ่งหมายของการคำนวณ critical load จึงเป็นการประเมินขีดความสามารถสูงสุดของระบบนิเวศในการรองรับสารมลพิษซึ่งไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อดัชนีชี้วัดภาพ และเพื่อกำหนดปริมาณสารมลพิษที่เหมาะสมที่สุด ที่แหล่งกำเนิดจะสามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้โดยมีผลกระทบต่อระบบนิเวศในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยออกมาแล้วมีผลกระทบกับระบบนิเวศในระดับที่ยอมรับได้เรียกว่า target load ซึ่งค่า target load นี้ อาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่า critical load ก็ได้ ขึ้นอยู่กับการใช้ประโยชน์ของระบบนิเวศ โดยปัจจัยในการกำหนดค่า target load ได้แก่ เศรษฐศาสตร์ และการยอมรับของสังคม (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 22)

## 2. หลักการประเมินค่า critical load ของแหล่งน้ำผิวดิน (surface water)

การคำนวณ critical load มีความซับซ้อนแตกต่างกันหลายระดับ มีทั้งเป็นแบบการทดลอง หรือการใช้แบบจำลองอธิบาย สามารถแบ่งวิธีการประเมินได้ ดังนี้ (Federal Environmental Agency. 1996: 67-69)

2.1 Empirical methods เป็นการหาค่า critical load ของกรด จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการตกสะสมของกรดกับผลกระทบที่ระบบนิเวศได้รับ โดยอาศัยการสังเกตการณ์หรือการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณ สัตว์ประจำถิ่น และความหลากหลายทางชีวภาพ หรือเป็นการทดลองที่อยู่ภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของพืชพรรณและสัตว์ประจำถิ่น เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างของระบบนิเวศและเปรียบเทียบองค์ประกอบของระบบนิเวศที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.2 Dynamic methods เป็นการคาดการณ์ปริมาณผลกระทบจากการตกสะสมกรดในระยะยาว โดยการคำนวณค่า critical load นี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีสมมติฐานว่าความเข้มข้นของสารมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องการข้อมูลมาก และมีการติดตามข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ

2.3 Steady state methods เป็นการคำนวณระดับการตกสะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศ โดยอาศัยการคำนวณจากสมการสมดุลมวล (mass balance) ระหว่างแหล่งกักเก็บพืชและแหล่งรองรับมลพิษภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงคงที่ ซึ่งมี 2 แนวทาง ได้แก่

2.3.1 Steady State Water Chemistry (SSWC) model เป็นการศึกษาค่า critical load ของกรดในระบบนิเวศแหล่งน้ำ ที่อาศัยสมการสมดุลมวลภายใต้สภาวะสมดุลระหว่างการตกสะสมกรดซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บพืช และ base cation ซึ่งเป็นแหล่งรองรับมลพิษ

2.3.2 The First - order Acidity Balance (FAB) model เป็นการศึกษาค่า critical load ของกรดในระบบนิเวศแหล่งน้ำ ซึ่งรวมพื้นที่รองรับน้ำด้วย การคำนวณจะอาศัยสมการสมดุลประจุ (charge balance) ภายใต้สภาวะสมดุลระหว่างแหล่งกักเก็บพืช และแหล่งรองรับมลพิษ

เนื่องจากการหาค่า critical load ด้วยวิธี Empirical methods เป็นการสำรวจจากระบบนิเวศจริงในแต่ละพื้นที่ และ Dynamic methods ต้องมีข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่มากพอ ทำให้ทั้ง 2 วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการศึกษา critical load ของแหล่งน้ำผิวดินที่มีข้อจำกัดในเรื่องของข้อมูล ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกศึกษาหลักการคำนวณ critical load ของกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดิน ด้วยวิธี Steady state water chemistry (SSWC) model และ

The First - order acidity balance (FAB) model ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Aherne J; et al. 2004: 26)

### 3. หลักการคำนวณค่า critical load โดยวิธี Steady State Water Chemistry Model

Steady state water chemistry (SSWC) model เป็นวิธีการคำนวณ critical load ของแหล่งน้ำผิวดินที่มีสมมติฐานว่า ปริมาณซัลเฟตและไนเตรทเกือบทั้งหมดในน้ำท่ามาจากการตกสะสมของสารมลพิษและละอองของเกลือทะเล (ICP Modelling & mapping. 2558) ในการคำนวณจะอาศัยข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีของน้ำในปัจจุบัน โดยใช้ค่า Acid neutralization capacity (ANC) เป็นความสามารถในการสะเทินกรดที่แหล่งน้ำมีศักยภาพ ซึ่งป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อตัวบ่งชี้ทางชีวภาพที่มีความไวมากที่สุดของแหล่งน้ำผิวดินนั้น ๆ (Federal Environmental Agency. 1996: 99)

critical load ของกรด ที่คำนวณด้วยวิธี SSWC model จะเป็นการคำนวณจากหลักการที่ว่าปริมาณกรดที่เข้าระบบจะต้องไม่เกินกว่าปริมาณ base cation ที่เข้าสู่แหล่งน้ำ ซึ่งไม่รวม base cation ที่มาจากน้ำทะเล (non-marine) และไม่ได้มาจากการกระทำของมนุษย์ (non-anthropogenic) ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่า critical load ตามวิธี SSWC model ได้จากแหล่งรองรับกรดในแหล่งน้ำ กล่าวคือ ปริมาณ base cation ที่คงอยู่ในแหล่งน้ำทั้งหมด (ICP Modelling & mapping. 2558)

$$CL_{(AC)} = BC_{dep}^* + BC_w - BC_{upt} - ANC_{limit} \quad \dots\dots\dots(5)$$

- เมื่อ  $CL_{(AC)}$  คือ ค่า critical load ของกรดของแหล่งน้ำผิวดิน (eq/ha/yr)  
 $BC_{dep}^*$  คือ ปริมาณ base cation ที่ตกสะสมซึ่งไม่รวมที่มาจากน้ำทะเล (eq/ha/yr)  
 $BC_w$  คือ ปริมาณ base cation จากการพุ้งทางเคมีของวัสดุต้นกำเนิดในลุ่มน้ำ (eq/ha/yr)  
 $BC_{upt}$  คือ ปริมาณ base cation สุทธิที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต (eq/ha/yr)  
 $ANC_{limit}$  คือ ปริมาณของ base cation ที่น้อยที่สุดที่สามารถสะเทินกรดซึ่งไม่ทำให้ดัชนีทางชีวภาพได้รับอันตราย (eq/ha/yr)

เนื่องจากการวัดค่าปริมาณ base cation จากการพุ้งทางเคมีของวัสดุต้นกำเนิดในลุ่มน้ำ ( $BC_w$ ) มีความยุ่งยากและมีข้อจำกัดในการวัดและเก็บข้อมูล ดังนั้นการคำนวณค่า critical load ด้วยวิธี SSWC model นี้ จึงอาศัยวิธีการหาค่าปริมาณ base cation ทั้งหมดที่พบในแหล่งน้ำ โดยจะถือว่าปริมาณ base cation ทั้งหมดที่คงอยู่ในแหล่งน้ำเป็นผลรวมของ  $BC_{dep}^*$   $BC_w$  และ  $BC_{upt}$  ที่เกิดจากตกสะสม ถูกชะละลายลงสู่แหล่งน้ำ และถูกพืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงสามารถคำนวณปริมาณ base cation ทั้งหมดในแหล่งน้ำได้จากปริมาณ base cation ทั้งหมดที่พบในแหล่งน้ำช่วงก่อนมีอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้จากน้ำทะเล เนื่องจากเราถือว่าช่วงก่อนอุตสาหกรรมเป็นช่วงที่ยังไม่มีการตกสะสมของกรดทำให้ base cation ที่อยู่ในแหล่งน้ำยังไม่ถูกใช้ในการสะเทินกรด สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (ICP Modelling & mapping. 2558)

$$BC^*_0 = BC^*_{dep} + BC_{w-} - BC_{upt} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่า critical load ได้โดยการนำสมการที่ (6) แทนเข้าไปในสมการที่ (5) ได้ดังนี้

$$CL_{(AC)} = BC^*_0 - ANC_{limit} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$CL_{(AC)} = Q \times ([BC]^*_0 - [ANC]_{limit}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ  $[BC]^*_0$  คือ ความเข้มข้นของ base cation ในแหล่งน้ำก่อนมีอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่มาจาก น้ำทะเล ( $\mu\text{eq/liter}$ )

Q คือ น้ำท่ารายปี ( $\text{m/yr}$ )

$[ANC]_{limit}$  คือ ความเข้มข้นของ base cation ในปริมาณที่น้อยที่สุด ( $\mu\text{eq/liter}$ )

สมการที่ (8) แสดงวิธีการคำนวณค่า critical load ในรูปแบบของปริมาตร (น้ำท่าเฉลี่ยรายปี) และ ความเข้มข้น ( $[X] = X / Q$ ) (Henriksen A; et al. 2002: 1289)

การศึกษาค่า critical load โดยวิธี SSWC model จะใช้ Acid Neutralization Capacity (ANC) เป็นเกณฑ์ทางเคมีสำหรับระบุภาวะวิกฤตของระบบนิเวศแหล่งน้ำ โดยใช้ระบุภาวะที่สิ่งมีชีวิตที่อ่อนไหวต่อความเป็นกรดได้รับอันตราย ซึ่งค่า ANC ที่ใช้จะต้องแน่ใจว่าจะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ ค่า ANC ที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถสะท้อนกรดโดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เรียกว่า  $ANC_{limit}$  สำหรับในสหราชอาณาจักร กำหนดใช้ค่า  $ANC_{limit}$  เท่ากับ 0  $\mu\text{eq/liter}$  (Henriksen A; & Dillon PJ. 2001: 11)

#### 4. หลักการคำนวณค่า critical load โดยวิธี The First - order acidity balance model

The First - order acidity balance (FAB) model เป็นการคำนวณ critical load ของกรด(ซัลเฟอร์และไนโตรเจน) ที่มีรูปแบบในการคำนวณลักษณะเดียวกับแบบจำลองสมดุลมวลอย่างง่าย ซึ่งใช้ในการคำนวณ critical load สำหรับดินป่าไม้ (Holmberg M; et al. 2013: 257) โดยการคำนวณค่า critical load ของกรดด้วยวิธี The First - order acidity balance (FAB) model นี้ จะพิจารณาเฉพาะซัลเฟอร์ (S) และไนโตรเจน (N) ที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำที่เกิดจากการตกสะสมเท่านั้น และจะถือว่าไนโตรเจนทั้งหมดที่เกิดจากกิจกรรมทางการเกษตรมีผลทำให้แหล่งน้ำเกิดความเป็นกรดเพียงเล็กน้อย จึงไม่นำมาพิจารณารวมในการคำนวณด้วยวิธีนี้ โดย FAB model เป็นการประมาณค่า critical load ที่อาศัยหลักการสมดุลประจุ ระหว่างแหล่งกำเนิดและแหล่งรองรับมลพิษ โดยกระบวนการทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในพื้นที่ลุ่มน้ำจากนั้นถูกพาไปยังแหล่งน้ำและมีกระบวนการกักเก็บไว้ในแหล่งน้ำ (Posch M; et al. 1997: 294) โดยแหล่งกำเนิดมลพิษหรือกรด คือการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ส่วนแหล่งรองรับมลพิษ ประกอบด้วยกระบวนการกักเก็บซัลเฟอร์และไนโตรเจนไว้ในแหล่งน้ำโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ การดูดซึมเพื่อใช้ในการ

เจริญเติบโตของพืช วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle) และ base cation ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Henriksen A; et al. 1993: 11)

$$N_{dep} + S_{dep}^* = fN_{upt} + (1 - r)(N_i + N_{de}) + rN_{ret} + rS_{ret} + BC_{dep}^* + (1 - r)BC_w - fBC_{upt} - Alk_{le} \dots (9)$$

|       |              |     |   |
|-------|--------------|-----|---|
| เมื่อ | $N_{dep}$    | คือ | การตกสะสมของไนโตรเจน (nitrogen deposition) (eq/ha/yr)                                   |
|       | $S_{dep}^*$  | คือ | การตกสะสมของซัลเฟอร์ (sulfur deposition) ซึ่งไม่รวมซัลเฟอร์ที่ได้รับจากทะเล (eq/ha/yr)  |
|       | $N_{upt}$    | คือ | ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต (nitrogen uptake) (eq/ha/yr)               |
|       | $N_i$        | คือ | กระบวนการ nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ (eq/ha/yr)                |
|       | $N_{de}$     | คือ | ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ denitrification (eq/ha/yr)                             |
|       | $N_{ret}$    | คือ | การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ (N retention) (eq/ha/yr)                                   |
|       | $S_{ret}$    | คือ | การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ (S retention) (eq/ha/yr)                                   |
|       | $BC_{dep}^*$ | คือ | base cation จากการตกสะสม (base cation deposition) ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล (eq/ha/yr) |
|       | $BC_w$       | คือ | base cation จากการผุพังทางเคมี (weathering rate of base cation) (eq/ha/yr)              |
|       | $BC_{upt}$   | คือ | base cation ที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต (base cation uptake) (eq/ha/yr)        |
|       | $Alk_{le}$   | คือ | การชะละลายของด่าง (leaching of alkalinity) (eq/ha/yr)                                   |
|       | $f$          | คือ | สัดส่วนของพื้นที่ป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ  |
|       | $r$          | คือ | สัดส่วนระหว่างพื้นที่แหล่งน้ำต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ  |

จากสมการที่ (9) พบว่าในการคำนวณ critical load ของกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดิน จะมีพารามิเตอร์การนำเข้าและสูญเสียของ base cation (deposition, weathering rate และ uptake) เป็นพารามิเตอร์ที่ยุงยากในการประเมินค่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประมาณค่า base cation ที่เกิดจากการผุพังทางเคมีในลุ่มน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของข้อมูล ดังนั้นวิธีการในการประมาณค่า base cation ( $BC_{dep}^* + (1 - r)BC_w - fBC_{upt}$ ) ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การกำหนดให้ base cation ( $BC_{dep}^* + (1 - r)BC_w - fBC_{upt}$ ) เท่ากับค่าการชะละลายของ base cation สุทธิ ประมาณได้จากการชะละลายของ base cation จากพื้นที่ลุ่มน้ำเข้าสู่แหล่งน้ำผิวดินช่วงก่อนมีอุตสาหกรรม สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (Posch M; et al. 1997: 293-294)

$$(BC_{dep}^* + (1 - r)BC_w - fBC_{upt}) = (Q[BC]_0) \dots \dots \dots (10)$$

ส่วนค่าการชะละลายของด่าง ( $Alk_{le}$ ) ในสมการที่ (9) หมายถึง ปริมาณ base cation ที่อยู่ในระบบนิเวศที่ใช้ในการสะเทินกรด ดังนั้น ค่าการชะละลายของด่าง ( $Alk_{le}$ ) จึงเป็น

ความสามารถของแหล่งน้ำในการสะเทินกรด หรืออาจเรียกว่า Acid Neutralization Capacity สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{Alk}_{\text{e}} = \text{Q}[\text{ANC}] \quad \dots\dots\dots(11)$$

ในการคำนวณ critical load ของกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดินด้วยวิธี FAB model จะใช้ค่า ANC เป็นเกณฑ์ทางเคมีในการระบุสภาวะวิกฤตของระบบนิเวศ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ ดังนั้นจึงใช้ค่า ANC ที่น้อยที่สุด ที่ใช้ในการสะเทินกรดแล้วไม่เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{Q}[\text{ANC}] = \text{Q}[\text{ANC}]_{\text{limit}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อนำสมการที่ (10) และ (12) แทนเข้าไปในสมการที่ (9) จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\text{N}_{\text{dep}} + \text{S}_{\text{dep}}^* = f\text{N}_{\text{upt}} + (1 - r)(\text{N}_i + \text{N}_{\text{de}}) + r\text{N}_{\text{ret}} + r\text{S}_{\text{ret}} + \text{Q}([\text{BC}]^*_0 - [\text{ANC}]_{\text{limit}}) \dots(13)$$

สมมติฐานที่สำคัญของสมการที่ (13) มีดังนี้ (Christopher Curtis; et al. 2000: 127)

- 1) พืชในลุ่มน้ำจะสามารถรองรับซัลเฟอร์ (S uptake) ในระยะยาวได้เพียงเล็กน้อย
- 2) ไนโตรเจนที่เข้าสู่แหล่งน้ำผิวดินจะพิจารณาเฉพาะที่เกิดจากการตกสะสมเท่านั้น ส่วนที่มาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ ไม่นำมาพิจารณา เช่น การใส่ปุ๋ยเพื่อกิจกรรมทางการเกษตรในลุ่มน้ำ
- 3) การชะละลายของแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) จะถือว่าน้อยมาก เนื่องจากเมื่อแอมโมเนียมที่เข้าสู่แหล่งน้ำจะถูกนำไปใช้ในหลายส่วน ทั้ง สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ การดูดซับของดิน และใช้ในกระบวนการ Nitrification

## พารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการคำนวณค่า critical load ด้วยวิธี SSWC model และ FAB model

สำหรับการประมาณค่า critical load ของกรด (ซัลเฟอร์และไนโตรเจน) สำหรับแหล่งน้ำผิวดิน จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. การตกสะสมของซัลเฟอร์ (Sulfur deposition; $\text{S}_{\text{dep}}$ )

การตกสะสมของซัลเฟอร์ถือเป็นตัวการที่สำคัญที่ทำให้แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด ซึ่งการตกสะสมของซัลเฟอร์มีที่มาจากทั้งการกระทำของมนุษย์และธรรมชาติ โดยเกิดจากการกระทำของมนุษย์ 70% ปัจจุบันพบว่าเกิดขึ้นในซีกโลกเหนือมากกว่าซีกโลกใต้ และอีก 30% จากแหล่งธรรมชาติ ซึ่งการกระทำของมนุษย์ที่สำคัญที่สุด ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิต การใช้ถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจาก เชื้อเพลิงเหล่านี้มีสารประกอบของซัลเฟอร์ปะปนอยู่ด้วย ฉะนั้นเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ ซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการที่ (14) (จินดา แต้มบรรจง. 2548: 42-43) ส่วนแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ จะเกิดจากกระบวนการทางชีววิทยา เปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มาจากกระบวนการทางชีววิทยาทั้งในดินและในทะเลโดยผ่านปฏิกิริยาการ

ออกซิเดชันเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งที่มาจากการระเบิดของภูเขาไฟที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (นิศาชล ประดับ. 2549: 7) รูปแบบการตกสะสมของซัลเฟอร์จากบรรยากาศมีทั้ง การตกสะสมแบบเปียกและการตกสะสมแบบแห้ง



## 2. การตกสะสมของไนโตรเจน (Nitrogen deposition; $N_{dep}$ )

ออกไซด์ของไนโตรเจนในบรรยากาศเมื่อถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนจะเกิดเป็นกรดไนตริก ดังนั้นการตกสะสมของไนโตรเจนเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด โดยแหล่งกำเนิดของไนโตรเจนจะเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ โดยจากธรรมชาติจะเกิดจากฟ้าแลบ ฟ้าผ่า หรือเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ รวมถึงเกิดจากการกระบวนย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต ส่วนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยทั่วไปพบว่าออกไซด์ของไนโตรเจนจะเกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหิน รวมทั้งจากยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม (พูลสุข โปธิรักษ์จิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 52-55) ดังสมการที่ (15) โดยรูปแบบการตกสะสมของไนโตรเจนจะมีลักษณะเดียวกับการตกสะสมของซัลเฟอร์



## 3. Base Cation (BC)

Base cation ในแหล่งน้ำผิวดินประกอบด้วย  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$   $Na^+$   $K^+$  ซึ่ง base cation เหล่านี้จะเป็นตัวรองรับซัลเฟอร์และไนโตรเจน โดยทำหน้าที่ในการสะเทินกรด ดังนั้นถ้าในแหล่งน้ำผิวดินมีปริมาณ base cation สูงจะทำให้แหล่งน้ำผิวดินนั้นมีความสามารถในการรองรับความเป็นกรดได้มาก base cation ทั้งหมดในแหล่งน้ำผิวดินในเวลาปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $BC_t^*$ ) จะเป็นผลรวมของ base cation จากการผุพังทางเคมี ( $BC_w$ ) base cation จากการตกสะสมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $BC_{dep}^*$ ) และ base cation ที่พืชดูดซึมไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ( $BC_{upt}$ ) (ICP Modelling & mapping. 2558) เขียนสมการได้ดังนี้

$$BC_t^* = BC_{dep}^* + BC_w - BC_{upt} + BC_{exc} \quad \dots\dots\dots(16)$$

เมื่อ  $BC_{exc}$  คือ ปริมาณ base cation ที่ถูกปลดปล่อยออกมาเนื่องจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอื่นๆ

รายละเอียดของตัวแปรต่างๆในสมการที่ (16) สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) Base cation การตกสะสม ( $BC_{dep}^*$ ) การตกสะสมของ base cation เป็นกระบวนการเพิ่ม base cation ให้กับระบบนิเวศ ซึ่งส่วนใหญ่ base cation ที่ตกสะสม มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบประเภทหินปูนเป็นวัตถุดิบหลัก เช่น โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ หรืออาจมาจากการระเบิดของภูเขาไฟ โดยที่ base cation ที่ได้จากการตกสะสม ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และ โซเดียม (Julian Aherne; et al. 2003: 27)

2) Base cation จากการผุพังทางเคมี ( $BC_w$ ) การผุพังทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของชั้นหินแร่และอินทรีย์วัตถุ โดยกระบวนการทางเคมี ที่เกิดจากหลายกระบวนการรวมกัน ทั้งการแตกตัว การตกตะกอน ปฏิกิริยากรด-เบส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยารีดอกซ์ และการเกิดสารประกอบ การผุพังจะเกิดขึ้นช้าๆ ถ้ามีความชื้นน้อย แต่ถ้ามีความชื้นมากขึ้นการผุพังจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (จินดา แต่มบรรจง. 2548: 8-9) กระบวนการผุพังนี้จะทำให้หินแร่และอินทรีย์วัตถุแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือสลายตัวโดยปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดเศษหินหรือเศษแร่ ดังนั้นกระบวนการผุพังทางเคมีของ base cation เป็นการเกิด base cation เนื่องจากสลายตัวของแร่ธาตุที่อยู่ในดิน (พูลสุข โพธิ์รักขิต-ปรัชญานุสรณ์. 2553: 96-97) อัตราการผุพังถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของดินในการเป็นบัฟเฟอร์เพื่อรักษาสภาพของดินไม่ให้เกิดความเป็นกรด (Henriksen A; et al. 2002: 1288) ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุต้นกำเนิด การหาอัตราการผุพังของดินแร่เป็นเรื่องยากที่จะสามารถประมาณค่าได้ และจนถึงปัจจุบันยังไม่มีวิธีการที่พิสูจน์ได้ว่าเป็นวิธีการที่ดีกว่าการประมาณค่าโดยใช้ความแตกต่างของประเภทดินและความเป็นกรดของดิน (Whitfield C.J; et al. 2013: 900)

3) Base cation ที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $BC_{upt}$ ) เป็นกระบวนการที่พืชดูดซึม แคลเซียม แมกนีเซียม และ โพแทสเซียม เพื่อใช้เป็นสารอาหารสำหรับพืช ซึ่งในระยะยาวจะพบว่า การดูดซึม base cation สุทธิของพืชจะใกล้เคียงกับ base cation ในชีวมวล ดังนั้นการดูดซึม base cation สุทธิจึงมีความสำคัญต่อการคาดการณ์ค่า critical load อย่างมาก (Federal Environmental Agency. 1996: 89) สมการที่ (16) สามารถคำนวณหาค่า base cation ที่ถูกปลดปล่อยออกมาเนื่องจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ( $BC_{exc}$ ) ได้โดยอาศัยสมมติฐานว่า base cation จากการตกสะสม base cation จากการผุพังทางเคมี และ base cation ที่พืชดูดซึมไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจะคำนวณค่า  $BC_{exc}$  ได้จากการแทนที่  $BC_{dep}^* + BC_w - BC_{upt}$  ในสมการที่ (16) ด้วยสมการที่ (6) และสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ (Henriksen A; & Dillon PJ. 2001: 26)

$$BC_{exc} = BC_t^* - BC_0^* \quad \dots\dots\dots(17)$$

เนื่องจากปริมาณ base cation ในลุ่มน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนไอออนจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของปริมาณ acid anion ซึ่งไม่รวมที่รับจากทะเล จึงสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$BC_{exc} = F(\Delta SO_4^* + \Delta NO_3) \quad \dots\dots\dots(18)$$

โดยที่ F เรียกว่า F-factor ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ base cation และ acid anion ดังนั้นสามารถคำนวณค่า ปริมาณ base cation ก่อนมีอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่รับจากทะเล ได้จากการแทน ค่า  $BC_{exc}$  ในสมการที่ (18) ด้วยสมการที่ (17) ดังนี้ (Arne Henriksen. 1998: 11)

$$[BC]_0^* = [BC]_t^* - F([SO_4^{2-}]_t^* - [SO_4^{2-}]_0^* + [NO_3^-]_t - [NO_3^-]_0) \dots\dots\dots(19)$$

เมื่อ  $[SO_4^{2-}]_t^*$  คือ ความเข้มข้นของซัลเฟตในเวลาช่วงปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่รับจากทะเล

$[\text{NO}_3^-]_t$  คือ ความเข้มข้นของไนเตรทในช่วงเวลาปัจจุบัน

$[\text{SO}_4^{2-}]_0^*$  คือ ความเข้มข้นของซัลเฟตช่วงก่อนอุตสาหกรรม ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล

$[\text{NO}_3^-]_0$  คือ ความเข้มข้นของไนเตรทช่วงก่อนอุตสาหกรรม

$[\text{BC}]_t^*$  คือ ความเข้มข้น Base cation ในเวลาช่วงปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล

3.1 การประเมินค่า F-factor กำหนดให้ F-factor จากสมการที่ (19) คือ อัตราการ ส่วนของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเข้มข้นของ base cation และ acid anion (Henriksen A; & Dillon P.J. 2001: 10) ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง เทียบกับเวลาช่วงก่อนมี อุตสาหกรรม ภายใต้สภาวะที่คงสมบัติน้ำเค็มของน้ำคงที่ (steady-state water chemistry) ดังนี้ (Henriksen A; & Dillon P.J. 2001: 26-27)

$$F = \frac{[\text{BC}]_t^* - [\text{BC}]_0^*}{[\text{SO}_4^{2-}]_t^* - [\text{SO}_4^{2-}]_0^* + [\text{NO}_3^-]_t^* - [\text{NO}_3^-]_0^*} \dots\dots\dots(20)$$

ค่า F ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ถ้าแหล่งน้ำที่มีความเข้มข้นของ base cation ต่ำ ค่า F เข้าใกล้ 0 แต่ถ้าเป็นทะเลสาบที่มีความเข้มข้นของ base cation สูง ค่า F จะเข้า ใกล้ 1 ค่า F สามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F = \sin\left(\frac{\pi[\text{BC}]_t^*}{S}\right) \dots\dots\dots(21)$$

เมื่อ S คือ ความเข้มข้นของ base cation ที่ทำให้ค่า  $F = 1.0$  และ ค่า F จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $[\text{BC}]_t^* > [S]$

ในประเทศแถบยุโรป เช่น Norway Finland และ Sweden จะกำหนดให้ค่า [S] เท่ากับ 400  $\mu\text{eq/liter}$  ดังนั้นแหล่งน้ำผิวดินที่มีค่า  $[\text{BC}]_t^*$  มากกว่า 400  $\mu\text{eq/liter}$  จะทำให้ F-factor มีค่า เท่ากับ 1 (Hindar A; et al. 2000: 11-12)

ค่า F-factor นี้จะไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ base cation ในช่วงเวลา ปัจจุบัน ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างต่อเนื่องระหว่างค่า F-factor และความเข้มข้นของ base cation ในช่วงเวลาปัจจุบัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = 1 - \exp(-2[\text{BC}]_0^*/[B]) \dots\dots\dots(22)$$

เมื่อ [B] คือ ตัวประกอบมาตรฐาน (scaling factor) ของความเข้มข้น

สำหรับประเทศ Finland ได้มีการศึกษาข้อมูลประวัติและคุณภาพน้ำในอดีต พบว่า [B] มีค่าประมาณ 131  $\mu\text{eq/liter}$  โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า F-factor ที่คำนวณด้วยสมการ ที่ (21) และ (22) พบว่าทั้งสองสมการจะให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันเมื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่า critical load ของแหล่งน้ำผิวดิน ทั้งนี้จากสมการที่ใช้ในการคำนวณ พบว่าค่า F-factor จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ base cation และเนื่องจากอัตราการผุพังทางเคมี (weathering rate) ของ แหล่งน้ำผิวดินจะขึ้นอยู่กับชั้นหิน (bedrock) และดินปิดทับ(overburden) ดังนั้นถ้าแหล่งน้ำผิวดินที่มี ลักษณะของชั้นหินและดินปิดทับเหมือนกันจะทำให้มีอัตราการผุพังทางเคมีใกล้เคียงกัน และถ้า แหล่งน้ำผิวดินสองแหล่งที่มีอัตราการผุพังทางเคมีใกล้เคียงกันแต่มีปริมาณน้ำท่าต่างกันจะทำให้

แหล่งน้ำผิวดินทั้งสองแหล่งมีความเข้มข้นของ base cation แตกต่างกันด้วย ดังนั้นค่า base cation ที่ใช้ในการคำนวณ F-factor จึงเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น ตามสมการต่อไปนี้ (ICP Modelling & mapping. 2558)

$$F = \sin\left(\frac{\pi Q[BC]_t^*}{S}\right) \quad \dots\dots\dots(23)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำท่ารายปี และ S เป็น ความเข้มข้น ที่ทำให้ค่า F = 1.0 และ ค่า F จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $Q[BC]_t^* > [S]$  (ICP Modelling & mapping. 2558)

3.2 การประเมินความเข้มข้นของซัลเฟตช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[SO_4^{2-}]_0^*$ ) ความเข้มข้นของซัลเฟตช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ในแหล่งน้ำผิวดิน สันนิษฐานว่าเท่ากับผลรวมของซัลเฟตที่มาจากบรรยากาศ และซัลเฟตที่มาจากธรณีวิทยาที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ base cation (Henriksen A; & Dillon P.J. 2001: 10) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

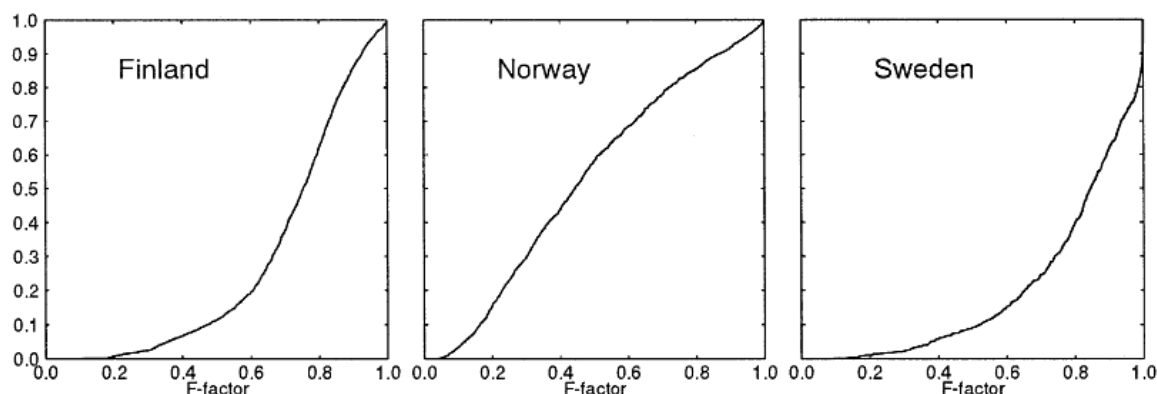
$$[SO_4^{2-}]_0^* = a + b [BC]_t^* \quad \dots\dots\dots(24)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ในสมการที่ (24) ได้จากการรวบรวมข้อมูลของพื้นที่ต่างๆสรุปไว้ในตาราง 1

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของซัลเฟต ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ที่ได้จากการศึกษา (N คือ จำนวนตัวอย่าง และ r คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์)

| a (meq/m <sup>3</sup> ) | b    | N    | r    | แหล่งที่มา   |
|-------------------------|------|------|------|--|
| 15                      | 0.16 | 143  | 0.38 | Lakes, Norway (Brakke et al 1989)                  |
| 8                       | 0.17 | 289  | 0.78 | Lakes, Norway (Henriksen; & Posch 2001)            |
| 5                       | 0.05 | n.g. | n.g. | Groundwater, Sweden (Wilander 1994)                |
| 14                      | 0.10 | 61   | 0.29 | Lakes, Finland (Posch et al. 1993)                 |
| 19                      | 0.08 | 251  | 0.66 | Lakes, N.Norway Finland Sweden (Posch et,al. 1997) |
| 9.5                     | 0.08 | 60   | 0.66 | Lakes, Ireland (Aherne et al. 2002)                |

ที่มา: ICP Modelling & mapping. (2558). Critical Loads for Aquatic Ecosystems.



ภาพประกอบ 6 ค่าการกระจายสะสม (Cumulative distribution functions) ของ F- factors สำหรับทะเลสาบใน Finland (ทะเลสาบ 1,450 แห่ง) Norway (ทะเลสาบ 2,305 แห่ง) และ Sweden (ทะเลสาบ 760 แห่ง)

ที่มา: Posch M; et al. (1997). Exceedance of Critical Loads for Lakes in Finland, Norway, and Sweden: Reduction Requirements for Acidifying Nitrogen and Sulfur Deposition. หน้า 296

#### 4. Acid Neutralization Capacity (ANC)

Acid Neutralization Capacity เป็นความสามารถของแหล่งน้ำในการสะเทินกรด ดังนั้น ANC จึงเป็นความเข้มข้นของ base cation ที่อยู่ในแหล่งน้ำที่ทำหน้าที่ในการรองรับและสะเทินกรดนั่นเอง ซึ่งค่า ANC ที่ใช้จะต้องแน่ใจว่าจะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Christopher Curtis; et al. 2000: 126) ดังนั้นจึงกำหนดให้ ANC เป็นความแตกต่างระหว่าง base cation ([BC]) และ strong acid anion ([AN]) (Martin Forsius; et al. 1992: 186)

$$[\text{ANC}] = [\text{BC}] - [\text{AN}] \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$[\text{ANC}] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{K}^+] + [\text{Na}^+] - [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] \dots\dots\dots(26)$$

|       |                      |     |                            |
|-------|----------------------|-----|----------------------------|
| เมื่อ | $[\text{Ca}^{2+}]$   | คือ | ความเข้มข้นแคลเซียมไอออน   |
|       | $[\text{Mg}^{2+}]$   | คือ | ความเข้มข้นแมกนีเซียมไอออน |
|       | $[\text{K}^+]$       | คือ | ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออน |
|       | $[\text{Na}^+]$      | คือ | ความเข้มข้นโซเดียมไอออน    |
|       | $[\text{SO}_4^{2-}]$ | คือ | ความเข้มข้นซัลเฟตไอออน     |
|       | $[\text{NO}_3^-]$    | คือ | ความเข้มข้นไนเตรทไอออน     |

การประเมินการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแหล่งน้ำผิวดินเนื่องจากการตกสะสมของกรดที่ไม่ได้เกิดจากการกิจกรรมของมนุษย์ จึงจำเป็นที่จะต้องรู้จำนวนไอออนทั้งหมดที่มีต้นกำเนิดมาจากละลอกของเกลือทะเล (sea salt spray) จึงสมมติว่าคลอไรด์ทั้งหมดที่พบในน้ำแหล่งน้ำผิวดิน

ดินมาจากละลายของเกลือทะเล และองค์ประกอบของเกลือทะเลทั้งหมดจะถูกเคลื่อนย้ายและมาสะสมอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินในสัดส่วนเดียวกับที่พบในน้ำทะเล ดังนั้นปริมาณ base cation ( $\mu\text{eq/liter}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Henriksen A; & Dillon P.J. 2001: 25 และ Federal Environmental Agenc. 1996: 100)

$$\text{Non-marine Ca}^{2+} = [\text{Ca}^{2+}] - 0.037 \times [\text{Cl}] \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$\text{Non-marine Mg}^{2+} = [\text{Mg}^{2+}] - 0.198 \times [\text{Cl}] \quad \dots\dots\dots(28)$$

$$\text{Non-marine Na}^+ = [\text{Na}^+] - 0.858 \times [\text{Cl}] \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$\text{Non-marine K}^+ = [\text{K}^+] - 0.018 \times [\text{Cl}] \quad \dots\dots\dots(30)$$

$$\text{Non-marine SO}_4^{2-} = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.103 \times [\text{Cl}] \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$\text{Non-marine Cl}^- = 0 \quad \dots\dots\dots(32)$$

ในการคำนวณ critical load ของกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดินจะใช้ค่า ANC เป็นเกณฑ์ทางเคมีในการระบุสภาวะวิกฤตของระบบนิเวศ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศ ดังนั้น ANC ที่ใช้จึงเป็นปริมาณ base cation ที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับและสะเทินกรดให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างและหน้าที่ของระบบนิเวศ หรือเรียกว่า ANC limit ( $\text{ANC}_{\text{limit}}$ ) ซึ่งอันตรายดังกล่าวจะพิจารณาที่ผลกระทบที่เกิดกับตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ เช่น ปลา การเลือกใช้ค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  จะต้องพิจารณาให้ละเอียดรอบคอบเนื่องจาก ค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  เป็นค่าสำคัญที่จะระบุศักยภาพในการรองรับการตกสะสมของกรดในแหล่งน้ำผิวดิน โดยเปลี่ยนไปตามสภาวะแวดล้อมของแหล่งน้ำผิวดินและตัวบ่งชี้ทางชีวภาพของแหล่งน้ำผิวดินนั้นๆ ทำให้แหล่งน้ำผิวดินแต่ละแห่งมีค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  ที่เฉพาะ โดยวิธีทั่วไปที่ใช้ในการกำหนดค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ICP Modelling & mapping. 2558)

4.1 การหาค่า ANC limit โดยอาศัยฟังก์ชันความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบง่ายระหว่าง  $[\text{ANC}_{\text{limit}}]$  กับ critical load ดังต่อไปนี้

$$[\text{ANC}_{\text{limit}}] = k \times \text{CL} \quad \dots\dots\dots(33)$$

นำค่า  $[\text{ANC}_{\text{limit}}]$  จากสมการที่ (33) ไปแทนที่ในสมการที่ (8) สำหรับคำนวณหาค่า critical load จะได้ดังนี้

$$\text{CL} = Q \times ([\text{BC}]_0^* - k \times \text{CL}) \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$\text{CL} = Q \times [\text{BC}]_0^* / (1+k \times Q) \quad \dots\dots\dots(35)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (33) และ (35) จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$[\text{ANC}_{\text{limit}}] = k \times Q \times [\text{BC}]_0^* / (1+k \times Q) \quad \dots\dots\dots(36)$$

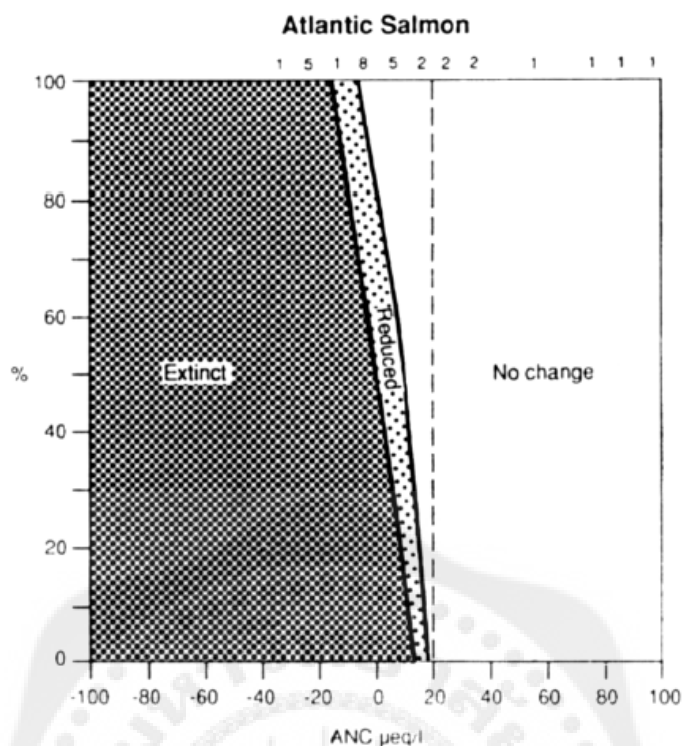
สำหรับในประเทศ Sweden ได้ใช้สมมติฐานว่า ถ้ากำหนดให้  $\text{CL} = 0 \mu\text{eq/ha/yr}$  ดังนั้น  $[\text{ANC}_{\text{limit}}]$  จึงเท่ากับ 0 และถ้า  $\text{CL} = 200 \mu\text{eq/ha/yr}$  ค่า  $[\text{ANC}_{\text{limit}}]$  จึงไม่ควรเกิน  $50 \mu\text{eq/liter}$  ดังนั้นจากสมการที่ (33) จึงสามารถหาค่าคงที่ k ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} k &= [\text{ANC}_{\text{limit}}] / \text{CL} \\ &= 50/200 \end{aligned}$$

$$= 0.25$$

ถ้า critical load มีค่ามากกว่า  $200 \mu\text{eq/ha/yr}$  จะกำหนดให้ค่า  $[\text{ANC}_{\text{limit}}]$  มีค่าคงที่เท่ากับ  $50 \mu\text{eq/liter}$

4.2 เปรียบเทียบค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  กับค่าที่ใช้กันทั่วไปในต่างประเทศ เพื่อเทียบความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ ตัวอย่างการประเมินค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  ของประเทศ Norwegian ได้แก่ การศึกษาของ Lien and others 1996 ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดของน้ำผิวดินและการสูญเสีย acid neutralization capacity (ANC) ในทะเลสาบของประเทศ Norwegian โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง (invertebrate) จากทะเลสาบ 165 แห่ง และข้อมูลประชากรปลาในทะเลสาบ 1,095 แห่ง รวมถึงข้อมูลประชากรปลาแซลมอนแอตแลนติก (Atlantic salmon) ในแม่น้ำ 30 แห่ง จากการศึกษาพบว่า สถานะของทั้งปลาและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจะมีความสัมพันธ์กับ ค่า ANC อย่างมาก โดย  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  ของปลาแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน โดยปลาแซลมอนแอตแลนติก (Atlantic salmon) จะมีความไวต่อความเป็นกรดของน้ำผิวดินมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ปลาเทราสีน้ำตาล (brown trout) ส่วนปลากะพง (perch) จะมีความทนต่อน้ำที่มีค่า pH ต่ำมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกปลาแซลมอนเป็นดัชนีบ่งชี้ (sensitive indicator) ความเป็นกรดของแม่น้ำ และเลือกปลาเทราสีน้ำตาลเป็นดัชนีบ่งชี้ (sensitive indicator) ความเป็นกรดของทะเลสาบ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวพบว่า ถ้า ANC เข้าใกล้ 0 หรือน้อยกว่า จะทำให้ประชากรปลาแซลมอนสูญพันธุ์ และถ้า ANC มีค่าเท่ากับ  $0 \mu\text{eq/liter}$  จำนวนประชากรปลาแซลมอน จะลดลง 50% แต่ไม่หายไปจากแม่น้ำ ในขณะที่ ANC มีค่าเท่ากับ  $20 \mu\text{eq/liter}$  พบว่าจะไม่มีผลกระทบกับจำนวนประชากรของปลาแซลมอน ภาพประกอบ 7 ดังนั้นค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  ที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อ sensitive indicator คือ  $20 \mu\text{eq/liter}$  (Lien L; et al. 1996:173-193)



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ANC และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับประชากรของปลา Atlantic Salmon

ที่มา : Lien L; et al. (1996). A critical limit for acid neutralizing capacity in Norwegian surface waters, based on new analyses of fish and invertebrate responses. หน้า 188

##### 5. การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ (Sulfur retention; $S_{ret}$ )

การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ถือเป็นแหล่งรองรับการตกสะสมของซัลเฟอร์ที่สำคัญ โดยซัลเฟอร์ที่ตกสะสมสู่แหล่งน้ำผิวดินแล้วบางส่วนจะถูกสะเทินด้วย base cation และส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักอยู่ในแหล่งน้ำในระยะยาว กระบวนการทางชีวภาพจะมีบทบาทสำคัญต่อการเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ เนื่องจากอัตราการดูดซึมซัลเฟตเพื่อการเจริญเติบโตของพืช ( $S_{upt}$ ) ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับซัลเฟตที่เข้าสู่แหล่งน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการตกสะสมซัลเฟตสูง การเก็บกักซัลเฟตนี้จะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในตะกอนดินใต้ท้องน้ำ (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 36-41)

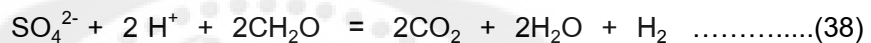
ในทะเลสาบการเก็บกักซัลเฟตโดยจุลินทรีย์จะมีบทบาทสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของซัลเฟต และ ไฮโดรเจนไอออน ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญด้วยกัน 2 กระบวนการ คือ ชั้นแรกซัลเฟตจะถูกใช้ไปในกระบวนการชีวสังเคราะห์ (Biosynthesis) และชั้นต่อไปจะถูกใช้ใน

ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (sulfate reduction) ซึ่งทั้งสองเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) มีรายละเอียดดังนี้ (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 202-203)

5.1 ซึ่วสังเคราะห์ (Biosynthesis) จุลินทรีย์ส่วนใหญ่รวมทั้งสาหร่ายจะดูดซึมซัลเฟตไปใช้ในปฏิกิริยาแอสซิมิเลชันของซัลเฟต (Sulfur assimilation) ดังสมการที่ (37) ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้ทั้งในน้ำ และตะกอนดินใต้ท้องน้ำ ปฏิกิริยานี้จะถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของซัลเฟต



5.2 ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (sulfate reduction) เป็นปฏิกิริยา ที่เกิดจากแบคทีเรียกลุ่ม sulfate reducing bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน และใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ดังสมการที่ (38) และเนื่องจากแบคทีเรีย sulfate reducing bacteria จะเจริญได้ในภาวะไม่มีออกซิเจนเท่านั้น ปฏิกิริยานี้จึงเกิดขึ้นในตะกอนดินใต้ท้องน้ำ



ส่วนมาก sulfate reducing bacteria จะอาศัยอยู่ในตะกอนดินใต้ท้องน้ำบริเวณที่ออกซิเจนไม่สามารถแทรกซึมลงมาได้ ซึ่งอาจจะอยู่ในระดับตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรจนถึงประมาณ 1 มิลลิเมตรจากด้านบนของผิวตะกอน อัตราการลดลงของซัลเฟตในแหล่งน้ำ โดยซัลเฟตที่ลดลงจะถูกเก็บกักไว้ในตะกอนดินนั้น จะถูกเก็บกักไว้ในหลายรูปแบบ ได้แก่ ferrous sulfide (FeS) pyrite (FeS<sub>2</sub>) และ organic S

ดังนั้นการเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำจึงสันนิษฐานว่าเป็นสัดส่วนกับปริมาณซัลเฟตที่เข้าสู่แหล่งน้ำสุทธิ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Xuemei Ye; et al. 2002: 193)

$$rS_{ret} = \rho_s \times S^*_{dep} \dots\dots\dots(39)$$

เมื่อ  $\rho_s$  คือ ปัจจัยการเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ kinetic ดังนี้

$$\rho_s = \frac{S_s}{S_s + Z/\tau} = \frac{S_s}{S_s + Q/r} \dots\dots\dots(40)$$

เมื่อ  $S_s$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต (mass transfer coefficient for sulfate )

Z คือ ค่าเฉลี่ยความลึกของทะเลสาบ

$\tau$  คือ ระยะเวลาในการกักเก็บของทะเลสาบ

Q คือ ปริมาณน้ำท่ารายปี

r คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่แหล่งน้ำผิวดินต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต นี้จะเกี่ยวข้องกับอัตราการกำจัดซัลเฟตสุทธิในตะกอนดินและความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเหนือผิวตะกอนดิน(overlying water) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังต่อไปนี้ (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 204-207)

$$S_s(\text{m/yr}) = \frac{\text{อัตราการกำจัดซัลเฟต } (\mu\text{mol/m}^2/\text{yr})}{\text{ความเข้มข้นของซัลเฟต } (\mu\text{mol/m}^3)} \dots\dots\dots(41)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) จากวิธีการต่อไปนี้

วิธีที่ 1 หาอัตราการกำจัดซัลเฟต ได้จากการหาปริมาณซัลเฟตในตะกอนดินที่ระดับความลึกต่างๆ เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเหนือผิวตะกอนดิน และตั้งข้อสันนิษฐานว่าอัตราการกำจัดซัลเฟต (sulfate remove) สุทธิจะเกิดขึ้นในทะเลสาบ ซึ่งวิธีนี้จะมีรายละเอียดที่ค่อนข้างยุ่งยาก

วิธีที่ 2 อัตราการกำจัดซัลเฟตคำนวณได้จาก mass balance budgets

วิธีที่ 3 หากจากอัตราการสะสมซัลเฟตในตะกอนดินในระยะยาวเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเหนือผิวตะกอนดิน

จากวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) ทั้ง 3 วิธีดังกล่าวข้างต้น แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) ที่ประมาณได้จากการเปรียบเทียบอัตราการกำจัดซัลเฟตทั้ง 3 วิธีกับความเข้มข้นของซัลเฟตในแหล่งน้ำ

| วิธีการ                               | ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ; m/yr) |
|---------------------------------------|---|
| Sediment $SO_4^{2-}$ profiles         | 0.17 – 0.36                                       |
| Whole-lake $SO_4^{2-}$                | 0.3 – 0.5   |
| Long-term S accumulation in sediments | 0.5 – 0.8   |

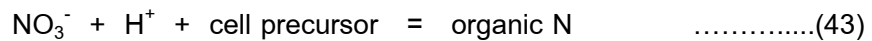
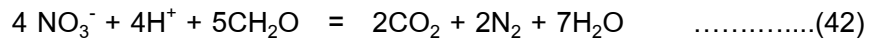
ที่มา: C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. (1992). Acidification of Freshwater Ecosystems Implications for the Future. หน้า 205

## 6. การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ (Nitrogen retention; $N_{ret}$ )

ไนโตรเจนที่ตกสะสมในแหล่งน้ำผิวดิน จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ได้แก่ การสะเทินไนโตรเจนด้วย base cation ถูกพืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และวัฏจักรไนโตรเจน จากนั้นไนโตรเจนบางส่วนที่เหลืออยู่ในแหล่งน้ำนั้นจะถูกเก็บกักไว้ในแหล่งน้ำ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนดินใต้ท้องน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีของไนโตรเจนจะเกิดขึ้นในตะกอนดินที่อยู่ในทะเลสาบและลำธาร (streams) จะเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของอินทรีวัตถุในชั้นตะกอนดินภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 45) ได้แก่

6.1 กระบวนการรีดิวซ์ไนเตรท (Dissimilatory nitrate reduction) แบคทีเรียกลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) จะใช้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เพื่อรีดิวซ์ไนเตรท ( $NO_3^-$ ) ให้เป็น ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) หรือแอมโมเนียมไอออน ( $NH_4^+$ ) ดังสมการที่ (42) (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 207-208)

6.2 กระบวนการ nitrate assimilation เกิดจากการที่พืช สัตว์ และแบคทีเรีย ใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายแทนออกซิเจนเพื่อการเจริญเติบโต โดยประสิทธิภาพกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของไนเตรทที่อยู่ในแหล่งน้ำ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และ ศักยภาพของระบบหรือสภาพแวดล้อมในดินในการให้หรือรับอิเล็กตรอน (redox potential) ดังสมการที่ (43) (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 207-208)



ดังนั้นการเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำจึงสันนิษฐานว่าเป็นสัดส่วนกับปริมาณไนเตรทที่เข้าสู่แหล่งน้ำสุทธิ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Henriksen A; et al. 1993: 12)

$$rN_{\text{ret}} = \rho_N [N_{\text{dep}} - fN_{\text{upt}} - (1 - r)(N_i + N_{\text{de}})] \quad \text{.....(44)}$$

เมื่อ  $\rho_N$  คือ ปัจจัยการเก็บกักไนเตรทในแหล่งน้ำ (retention factor) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ kinetic ดังนี้

$$\rho_N = \frac{S_N}{S_N + Z/\tau} = \frac{S_N}{S_N + Q/r} \quad \text{.....(45)}$$

เมื่อ  $S_N$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท (mass transfer coefficient for nitrate )

Z คือ ค่าเฉลี่ยความลึกของทะเลสาบ

$\tau$  คือ ระยะเวลาในการกักเก็บของทะเลสาบ

Q คือ ปริมาณน้ำท่ารายปี

r คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่แหล่งน้ำผิวดินต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท จะเกี่ยวข้องกับอัตราการกำจัดไนเตรทสุทธิ (nitrogen removal rate) และความเข้มข้นของไนเตรท ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังต่อไปนี้ (C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. 1992: 208)

$$S_N(\text{m/yr}) = \frac{\text{อัตราการกำจัดไนเตรท } (\mu\text{mol/m}^2/\text{yr})}{\text{ความเข้มข้นของไนเตรท } (\mu\text{mol/m}^3)} \quad \text{.....(46)}$$

การกำจัดไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$  removal) จากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) จะมีประสิทธิภาพ น้อยกว่ากระบวนการ nitrate assimilation เนื่องจากการดูดซึมไนเตรทจะเกิดขึ้นทั่วแหล่งน้ำผิวดิน แต่กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณตะกอนดิน ซึ่งในพื้นที่ที่มีการตกสะสมไนโตรเจนสูงจะมีแนวโน้มที่ไนเตรทจะสะสมอยู่ในแหล่งน้ำและมีผลกระทบต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของแหล่งน้ำ

### 7. ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต (Nitrogen uptake; $N_{upt}$ )

ไนโตรเจนที่ตกสะสมบางส่วนจะถูกพืชดูดซึมไปใช้เพื่อในการเจริญเติบโต ดังนั้นการดูดซึมไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณค่า critical load การประมาณค่าการดูดซึมไนโตรเจนสุทธิของพืชจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ประเภทของป่า และอายุของป่า (Julian A; et al. 2002: 13) สำหรับป่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณชีวมวลจะกำหนดให้ nitrogen uptake มีค่าเท่ากับ 0 (Federal Environmental Agency. 1996: 100)

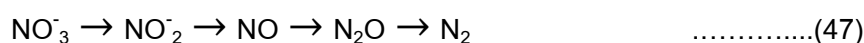
ตาราง 3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ ) ในทะเลสาบต่างๆ

| ทะเลสาบ                  | ปี          | $S_N$ (m/yr) |
|--------------------------|-------------|--------------|
| 302S (pre-acid)          | 1981        | 400          |
| 302N (pre-acid)          | 1981        | 220          |
| Crystal (Wisconsin)      | 1984        | 42           |
| Harp (central Ontario)   | 1984 - 1986 | 6.8          |
| Langtjern                | 1972 - 1978 | 6.8          |
| 302N (nitric acid added) | 1982 - 1985 | 5            |
| Dart's (New York)        | 1982 - 1984 | 0.89         |

ที่มา: C.E.W. Steinberg; & R.F. Wright. (1992). Acidification of Freshwater Ecosystems Implications for the Future. หน้า 209

### 8. ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification ( $N_{de}$ )

Denitrification เป็นกระบวนการเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นก๊าซไนโตรเจนกลับสู่บรรยากาศ โดยทั่วไปกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดภายใต้สภาพไร้อากาศ ที่อาศัยจุลินทรีย์กลุ่ม Denitrifying Bacteria เช่น *Pseudomonas.spp* *Thiobacillus.sp* และ *Bacillus.sp* เป็นต้น โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะอยู่ในดิน ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้ไนเตรทแทนออกซิเจนเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (วีรานุช หลาง. 2551: 74-75) ไนเตรทจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไนไตรท์ ซึ่งในขั้นต่อมาจะผลิตไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออก มาแล้วปล่อยสู่บรรยากาศดังสมการที่ (47)



การรวบรวมข้อมูลของ denitrification rate พบว่า denitrification rate จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง กระบวนการ denitrification อัตราการตกสะสมของไนโตรเจน ประเภท

ของดิน และ สภาพภูมิอากาศ โดยที่ denitrification rate จะเพิ่มขึ้นตามการตกสะสมของไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (48) และ (49) (Henriksen A; et al. 1993: 11)

$$N_{de} = f_{de} \times (N_{dep} - N_i - N_{upt}) \quad \text{สำหรับ พื้นที่ป่า} \quad \dots\dots\dots(48)$$

$$N_{de} = f_{de} \times (N_{dep} - N_i) \quad \text{สำหรับ พื้นที่อื่นๆ} \quad \dots\dots\dots(49)$$

เมื่อ  $f_{de}$  คือ สัดส่วนของกระบวนการ denitrification (denitrification fraction)

โดยที่ denitrification fraction จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความชื้นของดิน ซึ่งส่วนใหญ่ในยุโรปค่า denitrification fraction จะมีค่าต่ำ ยกเว้นในพื้นที่บริเวณ peat soil ที่อาจมีค่าสูงได้ โดยที่ค่าเฉลี่ยของ denitrification fraction สำหรับแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังต่อไปนี้ (Posch M; et al. 1997: 297)

$$f_{de} = 0.1 + 0.7f_{peat} \quad \dots\dots\dots(50)$$

เมื่อ  $f_{peat}$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ป่าพรุในพื้นที่ลุ่มน้ำ

### 9. กระบวนการ Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่ม (N<sub>i</sub>)

กระบวนการ nitrogen immobilization เป็นการศึกษาจุลินทรีย์หรือพืชที่อยู่ในดินเปลี่ยนสารประกอบอนินทรีย์ (แอมโมเนียม และไนเตรท) ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ (organic N) ซึ่งเป็นการเก็บไนโตรเจนไว้ในอินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลานานประมาณ 50-200 ปี (Julian A; et al. 2002: 13) วิธีการในการประมาณค่าอัตราการ nitrogen immobilization มีสมมติฐานคือ (Federal Environmental Agency. 1996: 93-94)

- 1) การเก็บข้อมูลอัตราการสะสมของไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง
- 2) ประมาณจากการประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนในดินในช่วงเวลาสั้นๆ
- 3) ประมาณได้จากอัตราส่วนระหว่าง C:N ในดินและในพืช

ตาราง 4 ค่า Nitrogen immobilization สำหรับดินประเภทต่างๆ

| Soil code | Soil description             | kq N/ha/yr | keq N/ha/yr |
|-----------|------------------------------|------------|-------------|
| 1         | Terrestrial raw soil         | 3          | 0.2143      |
| 2         | Raw gley soils               | 1          | 0.0714      |
| 3         | Lithomorphic soils           | 1          | 0.0714      |
| 3.1       | Rankers                      | 1          | 0.0714      |
| 3.2       | Sand rankers                 | 1          | 0.0714      |
| 3.4       | Rendzinas                    | 1          | 0.0714      |
| 3.6       | Sand parendzinas             | 1          | 0.0714      |
| 3.7       | Rendzina-like alluvial soils | 1          | 0.0714      |

ตาราง 4 (ต่อ)

| Soil code | Soil description               | kg N/ha/yr | keq N/ha/yr |
|-----------|--------------------------------|------------|-------------|
| 4.1       | Calcareous pelosols            | 1          | 0.0714      |
| 4.2       | Non-calcareous pelosols        | 1          | 0.0714      |
| 4.3       | Argillic pelosols              | 1          | 0.0714      |
| 5.1       | Brown calcareous earths        | 1          | 0.0714      |
| 5.2       | Brown calcareous sands         | 1          | 0.0714      |
| 5.3       | Brown calcareous alluvial soil | 1          | 0.0714      |
| 5.4       | Brown earths                   | 1          | 0.0714      |
| 5.5       | Brown sands                    | 1          | 0.0714      |
| 5.6       | Brown alluvial soils           | 1          | 0.0714      |
| 5.7       | Argillic brown earths          | 1          | 0.0714      |
| 5.8       | Paleo-argillic brown earths    | 1          | 0.0714      |
| 6.1       | Brown podsollic soils          | 3          | 0.2143      |
| 6.3       | Podsols                        | 3          | 0.2143      |
| 6.4       | Gley podsols                   | 3          | 0.2143      |
| 6.5       | Stagnopodsols                  | 3          | 0.2143      |
| 7.1       | Stagnogley soils               | 1          | 0.0714      |
| 7.2       | Stagnohumic gley soils         | 3          | 0.2143      |
| 8.1       | Alluvial gley soils            | 1          | 0.0714      |
| 8.2       | Sandy gley soils               | 1          | 0.0714      |
| 8.3       | Cambic gley soils              | 1          | 0.0714      |
| 8.4       | Argillic gley soils            | 1          | 0.0714      |
| 8.5       | Humic-alluvial gley soils      | 1          | 0.0714      |
| 8.6       | Humic-sandy gley soils         | 1          | 0.0714      |
| 8.7       | Humic gley soils               | 1          | 0.0714      |
| 9         | Man-made soils                 | 1          | 0.0714      |
| 9.2       | Disturbed soils                | 1          | 0.0714      |
| 10.1      | Raw peat soils                 | 3          | 0.2143      |
| 10.2      | Earthy peat soils              | 3          | 0.2143      |
| 2.2       | Unripened gley soils           | 1          | 0.0714      |
| 1.1       | Raw sands                      | 1          | 0.0714      |
| 4         | Pelosols                       | 1          | 0.0714      |

ตาราง 4 (ต่อ)

| Soil code | Soil description         | kg N/ha/yr | keq N/ha/yr |
|-----------|--------------------------|------------|-------------|
| 5         | Brown soils              | 1          | 0.0714      |
| 6         | Podzolic soils           | 3          | 0.2143      |
| 7         | Surface-water gley soils | 1          | 0.0714      |
| 8         | Ground-water gley soils  | 1          | 0.0714      |
| 10        | Peat soils               | 3          | 0.2143      |

ที่มา: Hall J; et al. (1998). Status of UK critical loads and exceedances. Part 1: Critical loads and critical load maps. หน้า 37-38

### ข้อมูลทั่วไปของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ

อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ สมัยก่อนชื่ออ่างเก็บน้ำเขื่อนเขาแหลม เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลองอย่างเป็นระบบเพื่อจัดสรรทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดอย่างต่อเนื่องตามหลักวิชาการการจัดการลุ่มน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้พัฒนาให้สามารถผลิตไฟฟ้า เพื่ออำนวยประโยชน์ให้กับประชาชนเพิ่มมากขึ้น เขื่อนวชิราลงกรณจึงจัดเป็นเขื่อนอเนกประสงค์แห่งหนึ่งของประเทศไทย อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณเป็นเขื่อนหินถมแห่งแรกของประเทศไทยที่ตาดผิวหน้าด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เริ่มก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2522 แล้วเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2527 มีตัวเขื่อนตั้งปิดกั้นแม่น้ำแควน้อย ที่ ตำบลท่าขนุน อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี อยู่ห่างจากตัวอำเภอไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ประมาณ 6 กิโลเมตร หรือห่างจากตัวจังหวัดกาญจนบุรีประมาณ 150 กิโลเมตร เป็นอ่างเก็บน้ำที่มีขนาดความจุในการกักเก็บน้ำใหญ่เป็นอันดับ 4 ของประเทศ (พิมล กตทรัพย์. 2550: 5)

อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณจะล้อมรอบไปด้วยภูเขาใหญ่น้อยเรียงสลับซับซ้อน บางแห่งเป็นหน้าผาสูง บางแห่งเป็นพื้นที่ราบอยู่ตามริมห้วยและริมแม่น้ำ ลักษณะการรับน้ำของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณจะได้รับน้ำจากลำน้ำสาขาของลำน้ำแควน้อย โดยทางตอนเหนือได้รับน้ำจากลำห้วยบิลลี่ใหญ่ ลำห้วยชองกาเลีย ลำห้วยรันตีและลำห้วยเกรียงไกร ส่วนในทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ได้รับน้ำจากลำห้วยบิลอก ลำห้วยประจำไม้ ลำห้วยบ้านไร่ ลำห้วยปากคอก และลำห้วยเขย่ง

#### 1. การใช้ประโยชน์เขื่อนวชิราลงกรณ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2558)

1.1 ด้านการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้าแห่งนี้มีกำลังการผลิตรวม 300,000 กิโลวัตต์ ให้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยปีละ ประมาณ 777 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง

1.2 ด้านการชลประทานและการเกษตร ทำให้มีแหล่งน้ำถาวรเพิ่มขึ้นอีกแห่งหนึ่งเพื่อช่วยเสริมระบบการ ชลประทานในพื้นที่ของโครงการแม่กลองใหญ่โดยเฉพาะทำการเพาะปลูกในฤดูแล้งจะได้ผลผลิตการเกษตรเพิ่มขึ้น

1.3 ด้านการประมง อ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อนมีพื้นที่ 388 ตารางกิโลเมตรเหมาะสำหรับเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลาน้ำจืดได้เป็นอย่างดี

1.4 ด้านการท่องเที่ยว เมื่อมีอ่างเก็บน้ำเกิดขึ้น ชุมชนต่างๆก็ได้อาศัยเป็นสถานที่พักผ่อนและแหล่งท่องเที่ยว

## 2. พื้นที่ลุ่มน้ำอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. 2558)

ลุ่มน้ำแม่กลองตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของประเทศไทย ทางฝั่งขวาของลุ่มน้ำเจ้าพระยาขอบเขตของลุ่มน้ำเริ่มจากอำเภออุ้มผาง ซึ่งอยู่ทางตอนล่างของเขตจังหวัดตาก ลงมาทางทิศใต้จนถึงเขตติดต่อระหว่างจังหวัดราชบุรีกับจังหวัดเพชรบุรี มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 30,180 ตารางกิโลเมตร ซึ่งอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยบิลอกซึ่งเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำแม่กลอง ลุ่มน้ำแม่กลองสามารถแบ่งตามสภาพภูมิประเทศได้เป็น 2 บริเวณ คือ

2.1 บริเวณลุ่มน้ำแม่กลองตอนบน เริ่มแต่เขตอำเภอเมืองกาญจนบุรีที่ลำน้ำแควใหญ่และแควน้อย ไหลมาบรรจบกัน ขึ้นไปยังที่สูงในเทือกเขา สภาพภูมิประเทศทางตอนบนของลุ่มน้ำเป็นที่สูง ซึ่งเป็นบริเวณที่ลำน้ำแควใหญ่และแควน้อยไหลผ่านซอกเขา และที่ราบระหว่างเขาออกมาบรรจบกัน

2.2 บริเวณที่เป็นลุ่มน้ำแม่กลองตอนล่าง คือสองฝั่งแม่น้ำแม่กลองจาก เขตอำเภอเมืองกาญจนบุรีไปจนออกอ่าวไทย สภาพภูมิประเทศทางตอนล่างมีลักษณะเป็นบริเวณที่ราบลุ่มกว้างขวาง อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเพียง 1-2 เมตร เมื่อเข้าไปในเขตใกล้ทะเลก็ยังมีลักษณะเป็นที่ราบชายฝั่งมีความลาดเอียงน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์

แม่น้ำแควน้อยมีความยาวประมาณ 390 กิโลเมตร เกิดจากเทือกเขาตะนาวศรีซึ่งเป็นเส้นกั้น พรมแดนด้านตะวันตกระหว่างประเทศไทยและประเทศเมียนมา ประกอบด้วยลำน้ำสำคัญ 3 สายคือ บีคี่ใหญ่ ซองกาเลีย และรันตี แม่น้ำแควน้อยไหลไปบรรจบกับแม่น้ำแควใหญ่ที่ อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี ก่อนเรียกกันว่า ปากแพรก ได้ชื่อใหม่ว่า แม่น้ำแม่กลอง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ. 2558) สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปของลุ่มน้ำแควน้อยจะเป็นภูเขาใหญ่น้อยเรียงสลับซับซ้อนและสูงชัน บางแห่งเป็นหน้าผาสูง บางแห่งเป็นที่ราบ ลำน้ำแควน้อยไหลผ่านภูมิประเทศที่สวยงาม มีน้ำตก มีห้วย และลำธารเล็กๆ ไหลลงลำน้ำเกือบตลอดสาย สภาพป่าส่วนใหญ่เป็นป่าไม้เบญจพรรณและป่าดงดิบ มีป่าไผ่แซมอยู่ทั่วไป

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลีฟ ลีน; อาร์เน เฮนริกสัน; และ ทอร์ เอส. ทราเอน (Leif Lien; Arne Henriksen ; & Tor S. Traaen. 1995: 703-713) ได้ทำการศึกษาค่า critical load ของกรดในแหล่งน้ำผิวดินใน Svalbard โดยจะพบว่า แหล่งน้ำผิวดิน 12% ที่อยู่ทางตอนเหนือของ Svalbard จะมีค่า critical load ของกรดน้อยกว่า 25 keq/km<sup>2</sup>/yr โดยที่แหล่งน้ำผิวดินอีก 67% จะมีค่า critical load ของกรดมากกว่า 100 keq/km<sup>2</sup>/yr

เลี่ย ดวน และคนอื่นๆ (Lei Duana; et al. 2000: 1-10) ได้ทำการศึกษาค่า critical load ของกรดในแหล่งน้ำผิวดินในประเทศจีน ด้วยวิธี The steady-state water chemistry method (SSWC) เพื่อทำแผนที่ critical load ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แหล่งน้ำผิวดินของประเทศจีนมีความไวต่อการตกสะสมของกรด โดยจะพบว่า ในภาคใต้ของประเทศจีนจะมีค่า critical load ของกรดสำหรับแหล่งน้ำผิวดินสูงมาก แต่ทางตะวันออกเฉียงเหนือและทางตะวันตกเฉียงเหนือของเทือกเขาทิเบต มีค่า critical load น้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบค่า critical load ของแหล่งน้ำผิวดินกับค่า critical load ของดิน ในประเทศจีนแล้วจะพบว่า ค่า critical load ของแหล่งน้ำผิวดิน จะมีค่าสูงกว่าเกือบทั่วทั้งประเทศ

เสวียเหมย เย่ และคนอื่นๆ (Xuemei Ye; et al. 2001: 189-203) ได้ทำการศึกษาคritical load ของกรดในแหล่งน้ำผิวดินในประเทศจีนทั่วประเทศ ด้วยวิธี The first – order acidity balance model ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า แหล่งน้ำผิวดินในประเทศจีนส่วนใหญ่มีค่า critical load ของการตกสะสมซัลเฟต และกรด อยู่ระหว่าง 2 -15 keq /ha/yr

ซี แกกเคส และคนอื่นๆ (Z. Gagkas; et al. 2010: 1235–1244) ได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของวิธีการในการคำนวณค่า critical load สำหรับน้ำท่าในป่าไม้ที่มีการขยายตัว โดยทำการเปรียบเทียบ ระหว่าง วิธี Steady state water chemistry (SSWC) model และ First-order acidity balance (FAB) models เพื่อประเมินความไวต่อการเกิดความเป็นกรดของน้ำท่าใน 14 ลุ่มน้ำที่มีสัดส่วนของพื้นที่ป่าที่แตกต่างกันในพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อความเป็นกรดของสหราชอาณาจักร โดยพบว่า ทั้ง 2 model สามารถทำนายค่า critical loads exceedance ของน้ำท่าในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำได้เหมือนกันแต่ค่า exceedance ที่ได้จะแตกต่างกันเนื่องจากค่า nitrogen leaching ที่ได้จากการคำนวณด้วย วิธี FAB model มีค่าสูง และประกอบกับในบางพื้นที่ลุ่มน้ำมีการตกสะสมของไนโตรเจนและ/หรือมีการตรึงไนโตรเจนโดยต้น alder แต่ทั้ง 2 model มีประสิทธิภาพในการระบุพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเป็นกรดได้ใกล้เคียงกัน

ทอดด์ ซี. แมคโดนเนลล์ และคนอื่นๆ (Todd C. Mc Donnell; et al. 2014: 407-419) ได้ทำการรวบรวมแบบจำลองทางสถิติที่ผ่านมาในระดับภูมิภาคเพื่อที่จะทำนายปริมาณ ANC ในน้ำท่า และ ค่า base cation weathering ของทางใต้ของเทือกเขาแอปพาเลเชียน (Appalachian Mountain) ของสหรัฐอเมริกา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมาณค่า critical load และ critical load exceedances ของซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่า 20.1% ของความยาวทั้งหมดของลำธารในภูมิภาค

ที่ศึกษา จะมีค่า ANC  $< 100 \mu\text{eq/liter}$  และพบว่า 1 ใน 3 ของความยาวทั้งหมดของลำธาร จะมีค่า critical load ของซัลเฟต  $< 50 \text{ meq/m}^2/\text{yr}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของภูมิภาคที่มีค่า critical load ของซัลเฟต เท่ากับ  $60 \text{ meq/m}^2/\text{yr}$



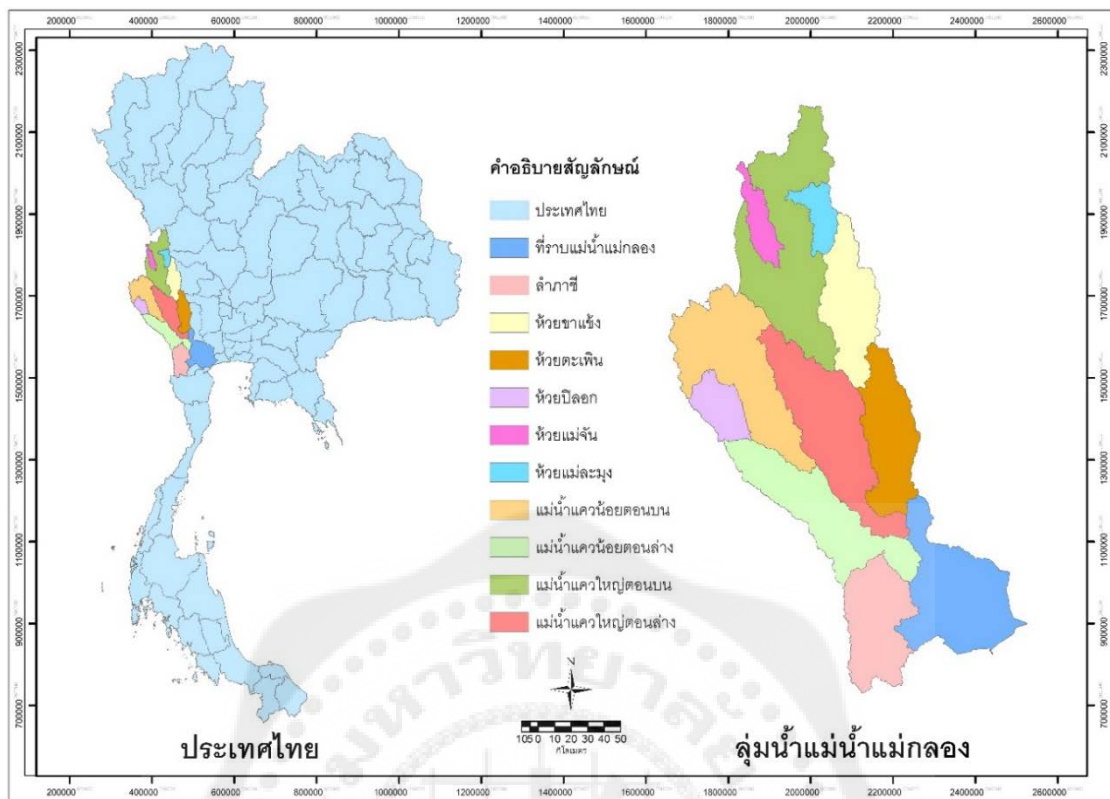
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของพื้นที่ศึกษา การคำนวณ critical load ของกรด และการประเมินพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกใช้วิธี The First-order acidity balance (FAB) model เป็นวิธีการประเมิน เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลไม่มากนัก ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้ ที่มีข้อจำกัดเรื่องฐานข้อมูล

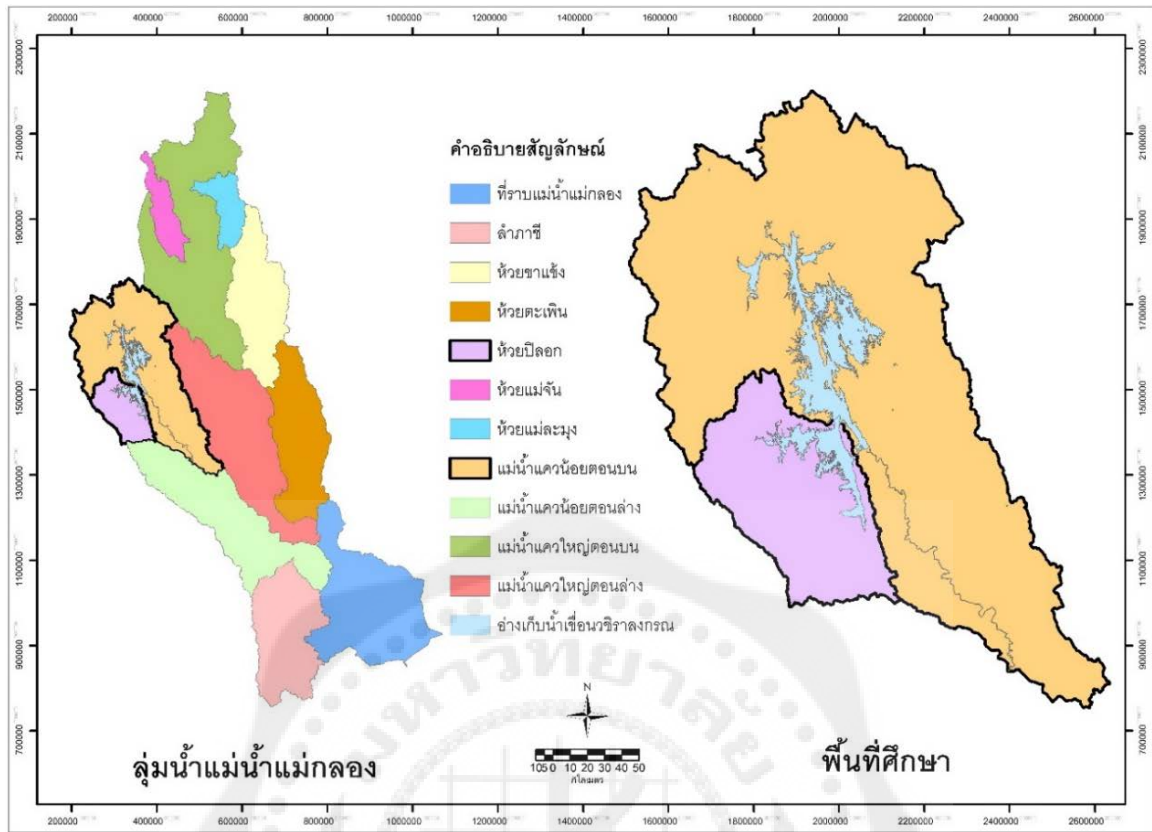
#### พื้นที่ศึกษา

การประเมินความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดินด้วยวิธี The First-order acidity balance (FAB) model ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเลือกศึกษาในพื้นที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ เนื่องจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณเป็นอ่างเก็บน้ำที่มีขนาดใหญ่มีความสำคัญต่อการประกอบอาชีพของประชาชนที่อยู่รอบเขื่อน อีกทั้งยังมีความพร้อมของข้อมูลสำคัญที่เพียงพอในการศึกษา ได้แก่ ข้อมูลทางอุทกวิทยา ข้อมูลการตกสะสม และข้อมูลคุณภาพน้ำ อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกซึ่งเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำแม่กลอง (ดังภาพประกอบ 7 และ 8) โดยลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 4,115 ตารางกิโลเมตร และ ลุ่มน้ำห้วยปิลอกมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 952 ตารางกิโลเมตร มีพื้นที่รองรับน้ำ 388 ตารางกิโลเมตร สภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นป่ามีภูเขาใหญ่น้อยเรียงสลับซับซ้อน พื้นที่ป่าส่วนใหญ่เป็นป่าไม้เบญจพรรณและป่าดงดิบ มีป่าไผ่แซมอยู่ทั่วไป (ดังภาพประกอบ 10)



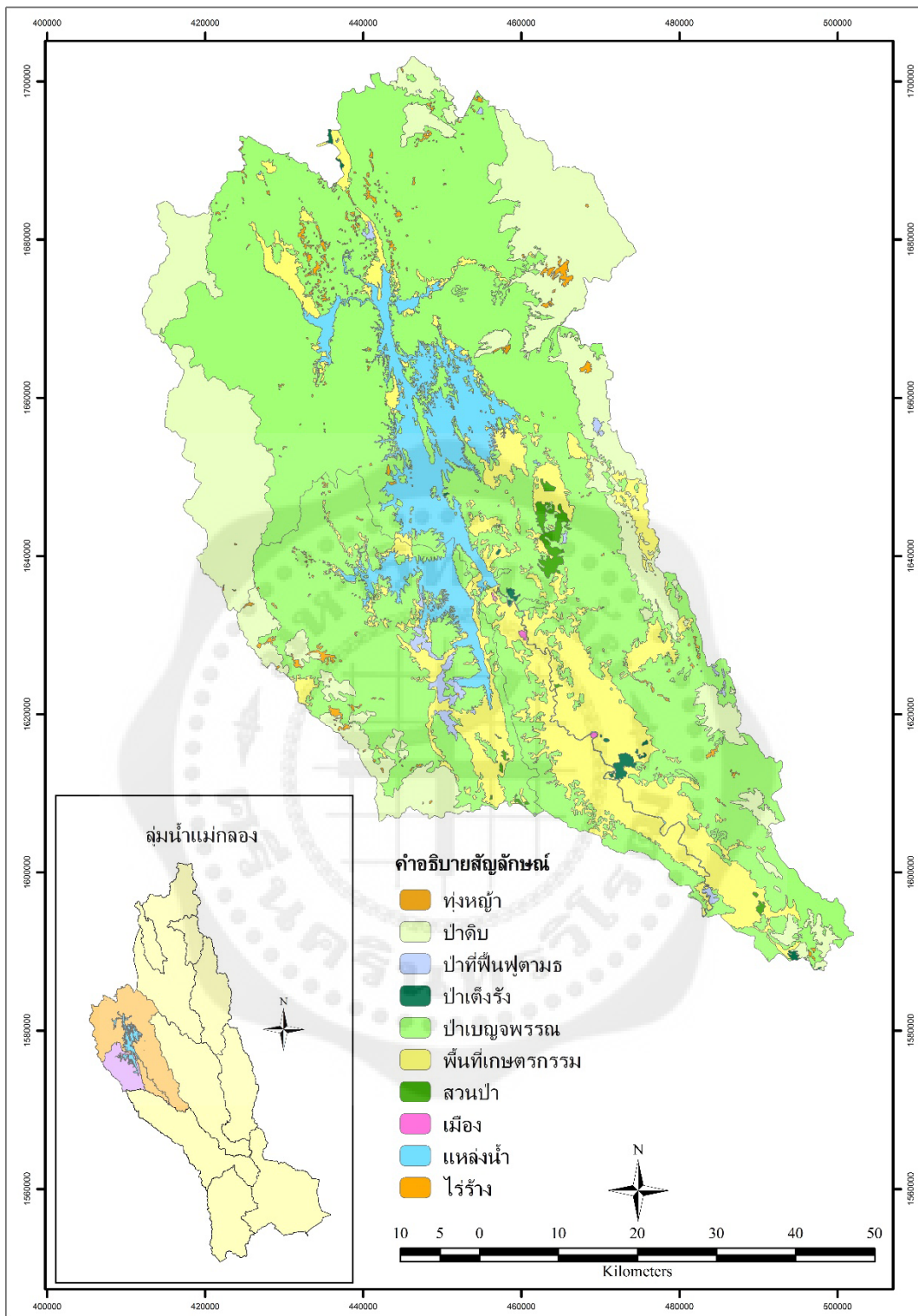
ภาพประกอบ 8 ขอบเขตลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำแม่กลอง

ที่มา: ปรับปรุงจากข้อมูลกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช



ภาพประกอบ 9 พื้นที่ศึกษา

ที่มา: ปรับปรุงจากข้อมูลกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช



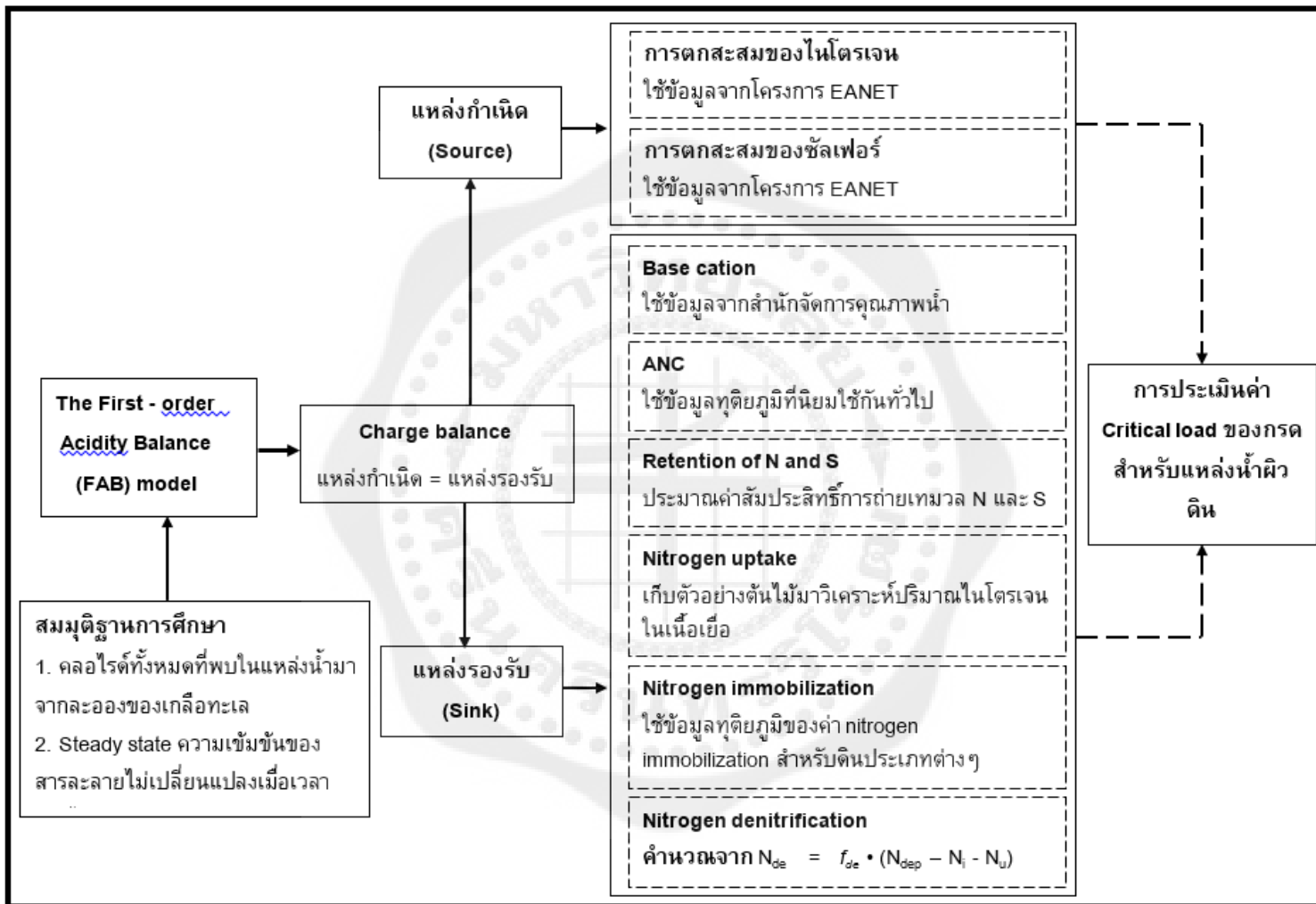
ภาพประกอบ 10 ประเภททรัพยากรป่าไม้ในลุ่มน้ำแม่ห้าแควน้อยตอนบนและห้วยปิลอก

ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช ปี 2543

## กรอบการศึกษา

จากการศึกษาวิธีการประเมินค่าความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดิน พบว่ามีหลายวิธีการในการคำนวณ ได้แก่ Empirical methods Dynamic methods และ Steady state methods ซึ่งจากการศึกษารายละเอียดของทั้ง 3 วิธี พบว่า Empirical methods และ Dynamic methods เป็นวิธีที่ต้องการข้อมูลที่ต่อเนื่องและใช้เวลาในการรวบรวมข้อมูลที่ยาวนาน อีกทั้งในปัจจุบันประเทศไทยยังมีข้อจำกัดในเรื่องของฐานข้อมูล ทำให้ทั้ง 2 วิธีนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ดังนั้นในการศึกษาค่า critical load ของกรดในแหล่งน้ำผิวดินในครั้งนี้ จึงเลือกวิธี The First - order acidity balance (FAB) model ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด โดย FAB model เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการ สมดุลประจุ ระหว่างแหล่งกำเนิดและแหล่งรองรับมลพิษในระบบนิเวศที่สภาวะสมดุล จึงสามารถสรุปเป็นกรอบการศึกษาได้ ดังนี้





ภาพประกอบ 11 กรอบการศึกษา

## การศึกษาและประเมินพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณค่า critical load

การคำนวณค่า critical load ของกรด สำหรับอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ในการศึกษาจะใช้วิธี The First - order acidity balance (FAB) model ซึ่งได้อธิบายสมมติฐานและหลักการในบทที่ 2 โดยสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$CL(N) + CL(S) = fN_{upt} + (1 - r)(N_i + N_{de}) + rN_{ret} + rS_{ret} + Q([BC]_0^* - [ANC]_{limit}) \dots \dots \dots (51)$$

เมื่อนำค่าในบทที่ 2 ได้แก่  $rS_{ret}$ ,  $rN_{ret}$  และ  $N_{de}$  จากสมการที่ (39), (44) และ (48) ตามลำดับ มาแทนลงในสมการที่ (51) จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (52)

$$a_N CL(N) + a_S CL(S) = b_1 N_{upt} + b_2 N_i + Q([BC]_0^* - [ANC]_{limit}) \dots \dots \dots (52)$$

เมื่อ  $a_N$ ,  $a_S$ ,  $b_1$  และ  $b_2$  เป็นค่าคงที่ มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า  $a_N$ ,  $a_S$ ,  $b_1$  และ  $b_2$  ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$a_N = [1 - f_{de}(1 - r)](1 - \rho_N) \dots \dots \dots (53)$$

$$a_S = 1 - \rho_S \dots \dots \dots (54)$$

$$b_1 = f(1 - f_{de})(1 - \rho_N) \dots \dots \dots (55)$$

$$b_2 = (1 - r)(1 - f_{de})(1 - \rho_N) \dots \dots \dots (56)$$

โดยที่  $a_N$  คือ สัดส่วนของไนโตรเจนที่ตกสะสมที่ทำให้แหล่งน้ำผิวดินเกิดความเป็นกรด

$a_S$  คือ สัดส่วนของซัลเฟตที่ตกสะสมที่ทำให้แหล่งน้ำผิวดินเกิดความเป็นกรด

เมื่อพิจารณาสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า critical load โดยวิธี FAB model จะพบว่ามีพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการคำนวณได้แก่ ความเข้มข้นของ base cation ก่อนออกสู่สาหร่ายซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ), Acid Neutralization Capacity limit ( $[ANC]_{limit}$ ), น้ำท่ารายปี ( $Q$ ), การตกสะสมของซัลเฟตซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเลและการตกสะสมของไนโตรเจน ( $S_{dep}^*$ ,  $N_{dep}$ ), ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_S$ ), ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนโตรเจน ( $S_N$ ), ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ), และ nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ ( $N_i$ ) ซึ่งมีแนวทางในการประเมินพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

### 1. การประเมินค่าความเข้มข้นของ base cation ก่อนออกสู่สาหร่ายซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[BC]_0^*$ )

Base cation ในแหล่งน้ำผิวดินประกอบด้วย  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  และ  $K^+$  และเนื่องจากข้อมูลความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในช่วงก่อนออกสู่สาหร่าย คือ ก่อนปี 2511 ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะมีการประกอบกิจการโรงงานในจังหวัดกาญจนบุรี ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณไม่ได้มีการสำรวจไว้ ทำให้ไม่มีข้อมูลนี้ ดังนั้นในการประเมินค่าความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนออกสู่สาหร่ายซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ) จึงต้องใช้สมการในการคำนวณ ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$[BC]_0^* = [BC]_t^* - F([SO_4^{2-}]_t^* + [NO_3^-]_t - [SO_4^{2-}]_0^* - [NO_3^-]_0) \dots \dots \dots (57)$$

โดยมีสมมติฐานว่าความเข้มข้นของไนเตรทก่อนออกสู่อุตสาหกรรม ( $[\text{NO}_3^-]_0$ ) มีค่าเป็น 0 จึงมีพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาต่อไปมีดังนี้

1.1 ความเข้มข้นของ base cation ในเวลาปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[\text{BC}]_t^*$ ) การหาค่า  $[\text{BC}]_t^*$  สามารถประมาณได้จากการใช้ข้อมูลความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  ที่มีอยู่ในน้ำในเวลาปัจจุบัน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย ของสำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ เนื่องจากโครงการดังกล่าวมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อการวิเคราะห์บริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ อ่างทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และนำค่าความเข้มข้นของ base cation ที่ได้จากการรวบรวมมาแก้ไขค่า sea salt ตามสมการที่ (27) – (30) ในบทที่ 2

1.2 ความเข้มข้นของซัลเฟตในเวลาปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[\text{SO}_4^{2-}]_t^*$ ) การประเมินในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลความเข้มข้นซัลเฟต จากโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย โดยเลือกใช้ข้อมูลจากจุดเก็บตัวอย่างเขื่อนวชิราลงกรณ อ่างทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และนำมาแก้ไขค่า sea salt ตามสมการที่ (31) ในบทที่ 2

1.3 ความเข้มข้นของ ไนเตรทในเวลาปัจจุบัน ( $[\text{NO}_3^-]_t$ ) ใช้ข้อมูลจากโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย ที่จุดเก็บตัวอย่างเขื่อนวชิราลงกรณ อ่างทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

1.4 ความเข้มข้นของซัลเฟตก่อนมีอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $[\text{SO}_4^{2-}]_0$ ) สำหรับประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถคำนวณได้ เนื่องจากข้อมูลความเข้มข้นของซัลเฟตในช่วงก่อนอุตสาหกรรมของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณไม่ได้มีการสำรวจและรายงานไว้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้การประเมินด้วยสมการเชิงเส้น ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$[\text{SO}_4^{2-}]_0^* = a + b [\text{BC}]_t^* \quad \dots\dots\dots(58)$$

จากตารางที่ 1 ในบทที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ที่ได้จากการทดลองหาค่าความเข้มข้นของซัลเฟต (ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล) จากทะเลสาบในประเทศต่างๆ ในหลายประเทศ เช่น Norway Finland และ Sweden เป็นต้น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ a และ b พบว่า จากการทดลองของ Henriksen and Posch, 2001 ที่ทำการทดลองหาค่า  $[\text{SO}_4^{2-}]_0^*$  ของทะเลสาบในประเทศ Norway จำนวน 289 แห่ง และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ a เท่ากับ 8 และ b เท่ากับ 0.17 สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$[\text{SO}_4^{2-}]_0^* = 8 + 0.17[\text{BC}]_t^* \quad \dots\dots\dots(59)$$

## 2. Acid Neutralization Capacity limit ( $\text{ANC}_{\text{limit}}$ )

$\text{ANC}_{\text{limit}}$  คือ ปริมาณ base cation ที่น้อยที่สุดที่สามารถรองรับและสะเทินกรดให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างและหน้าที่ของระบบนิเวศ อีกทั้งยังเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตาม

สภาวะแวดล้อมของแหล่งน้ำผิวดินและตัวบ่งชี้ทางชีวภาพของแหล่งน้ำผิวดินนั้นๆ วิธีการประมาณค่า  $ANC_{limit}$  ได้กล่าวในบทที่ 2 ในการศึกษาที่ใช้วิธีการประมาณค่า  $ANC_{limit}$  โดยการเปรียบเทียบค่า  $ANC_{limit}$  ที่ใช้กันทั่วไป เพื่อพิจารณาความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ โดยเลือกใช้ค่า  $ANC_{limit}$  เท่ากับ  $20 \mu eq/liter$  ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนประชากรของปลาแซลมอนที่เป็น sensitive indicator เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำค่า  $ANC_{limit}$  เท่ากับ  $20 \mu eq/liter$  มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากปลาแซลมอนเป็นปลาน้ำกร่อยที่ว่ายเข้าสู่แม่น้ำเพื่อวางไข่ ซึ่งน้ำกร่อยจะมีความเป็นด่างมากกว่าน้ำจืด ดังนั้นปลาแซลมอนจึงมีความสามารถในการทนกรดได้น้อยกว่าปลาน้ำจืดที่อยู่ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ทำให้การเลือก  $ANC_{limit}$  เท่ากับ  $20 \mu eq/liter$  มีความปลอดภัยต่อปลาในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณยิ่งขึ้น

### 3. น้ำท่ารายปี (Q)

น้ำท่ารายปี (Annual runoff) ที่ใช้ในการคำนวณค่า critical load ในการศึกษาครั้งนี้ หมายถึง ปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณจากพื้นที่รับน้ำ ซึ่งการประมาณปริมาณน้ำท่ารายปีดังกล่าว สามารถประมาณได้โดยการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ลุ่มน้ำ และหักส่วนที่สูญเสียจากกระบวนการต่างๆ เช่น การเก็บกักบนต้นไม้, การซึมลงดิน และการระเหย เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะประมาณปริมาณน้ำท่ารายปี จากปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ดังสมการที่ 60 ข้อมูลหตุยภูมิปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณในการศึกษานี้จะทำการรวบรวมจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

$$Q = I/A \quad \dots\dots\dots(60)$$

เมื่อ Q คือ น้ำท่ารายปี (m/yr)

I คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (m<sup>3</sup>/yr)

A คือ พื้นที่ลุ่มน้ำ (m<sup>2</sup>)

### 4. การตกสะสมของซัลเฟตซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเลและการตกสะสมของไนโตรเจน ( $S_{dep}^*$ , $N_{dep}$ )

การประมาณค่าการตกสะสมของซัลเฟตซึ่งไม่รวมที่มาจากทะเล ( $S_{dep}^*$ ) และการตกสะสมของไนโตรเจน ( $N_{dep}$ ) ถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อการคำนวณค่า critical load ของกรด เนื่องจากแหล่งน้ำผิวดินแต่ละแหล่งจะมีปริมาณการตกสะสมของกรดแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบได้แก่ ทิศทางและความแรงของลม ระยะห่างของแหล่งกำเนิดมลพิษกับแหล่งน้ำ ปริมาณของมลพิษที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด ซึ่งเหล่านี้จะมีผลต่อปริมาณการตกสะสมของกรด โดยการตกสะสมของกรด มี 2 รูปแบบ คือ การตกสะสมแบบเปียก และการตกสะสมแบบแห้ง ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ข้อมูล จากโครงการเครือข่ายการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในภูมิภาคเอเชียตะวันออก (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET) ซึ่งเป็นโครงการที่ดำเนินการร่วมกัน 13 ประเทศ ได้แก่ จีน เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น มองโกเลีย รัสเซีย เวียดนาม

มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ไทย กัมพูชา ลาว และพม่า เป็นเครือข่ายในการติดตามตรวจสอบสถานการณ์การตกสะสมของกรด เพื่อนำไปสู่การแก้ไขปัญหาการตกสะสมของกรดอย่างยั่งยืนต่อไป ซึ่งในประเทศไทยมีจุดตรวจวัดการตกสะสมของกรด อยู่ 6 แห่ง ได้แก่ กรุงเทพฯ, ปทุมธานี, สมุทรปราการ, กาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ), เชียงใหม่ (แม่เหียะ) และ นครราชสีมา

### 5. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ )

เนื่องจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) เกี่ยวข้องกับอัตราการกำจัดซัลเฟตสุทธิในตะกอนดินและความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเหนือผิวตะกอนดิน ซึ่งวิธีการในการประมาณค่า  $S_s$  จะมีอยู่ทั้งหมด 3 วิธี (รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2) โดยค่า  $S_s$  ที่ประมาณได้จากทั้ง 3 วิธี มีค่าอยู่ในช่วง 0.2 - 0.8 m/yr สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาและรายงานค่า  $S_s$  ของแหล่งน้ำผิวดิน อีกทั้งวิธีการในการประมาณ  $S_s$  มีรายละเอียดที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้ระยะเวลานาน ซึ่งเมื่อพิจารณาวิธีการทั้งสามที่ใช้ในการประมาณค่า  $S_s$  พบว่า วิธีการที่ 3 เป็นวิธีการที่ได้จากการสำรวจและเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลานาน (รายละเอียดดังตาราง 2 ในบทที่ 2) ในการศึกษาจึงเลือกใช้ค่าที่ศึกษาจากวิธีการที่ 3 มีค่าประมาณ 0.5 - 0.8 m/yr สำหรับการศึกษา นี้ ใช้ค่า  $S_s$  เท่ากับ 0.5 m/yr เนื่องจากเป็นค่าที่มีความปลอดภัยต่อ sensitive indicator ที่สุด และเป็นค่ากลางที่นิยมใช้กันทั่วไป

### 6. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ ) สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการศึกษา ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ข้อมูลหัตถ์จากการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรทในทะเลสาบต่างๆ (รายละเอียดดังตาราง 3 ในบทที่ 2) จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าค่า  $S_N$  ที่ใช้กันทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 2 - 8 m/yr ดังนั้นการเลือกใช้ค่า  $S_N$  เท่ากับ 5 m/yr ซึ่งเป็นค่ากลางของค่าที่นิยมใช้กันทั่วไป

### 7. ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ )

การศึกษานี้อาศัยข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชมาใช้สำหรับประเมินปริมาณไนโตรเจนที่พืชดูดซึม (uptake) ซึ่งมีหลักการว่า ปริมาณไนโตรเจนที่พืชใช้เพื่อการเจริญเติบโตเท่ากับปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ถูกพืชดูดซึมไปใช้ (uptake) โดยจะทำการเก็บตัวอย่างส่วนต่างๆ ของพืชเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ทั้งนี้ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกมีสภาพป่าเป็นป่าเบญจพรรณที่ไม่มีไม้สัก ซึ่งจัดอยู่ในป่าประเภทป่าผลัดใบ ในการศึกษาจะเลือกเก็บตัวอย่างพืชในส่วนของเนื้อไม้บริเวณลำต้นและกิ่ง เท่านั้น โดยสามารถคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนที่ใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Federal Environmental Agency. 1996: 89-92)

$$N_u^{(g)} = k_{gr} \times \rho \times (ctX_{st} + f_{br-st} \times ctX_{br}) \quad \dots\dots\dots(61)$$

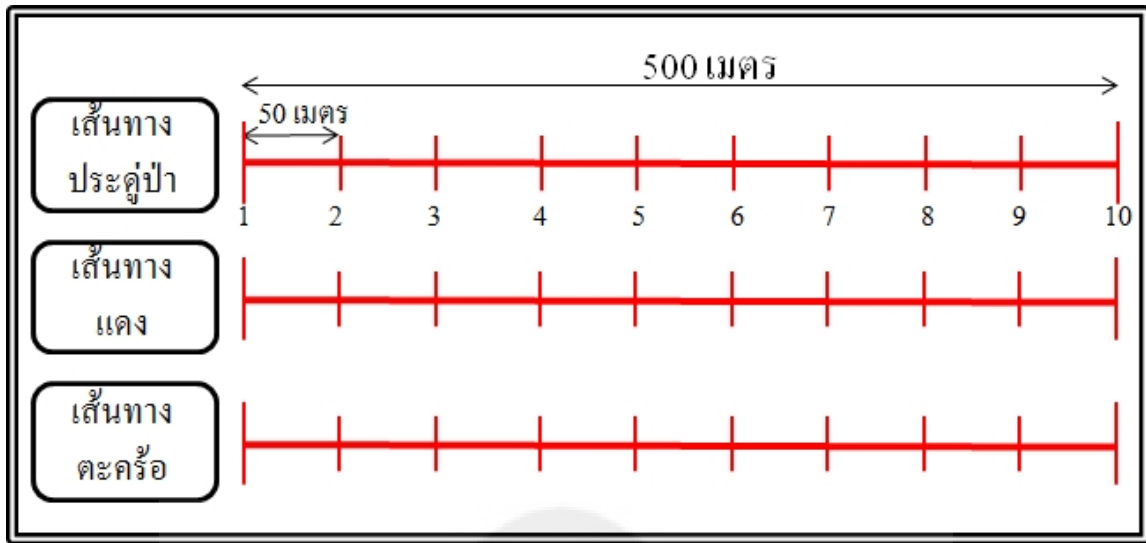
หรือ

$$N_u^{(g)} = NPP \times (ctX_{st} + f_{br-st} \times ctX_{br}) \quad \dots\dots\dots(62)$$

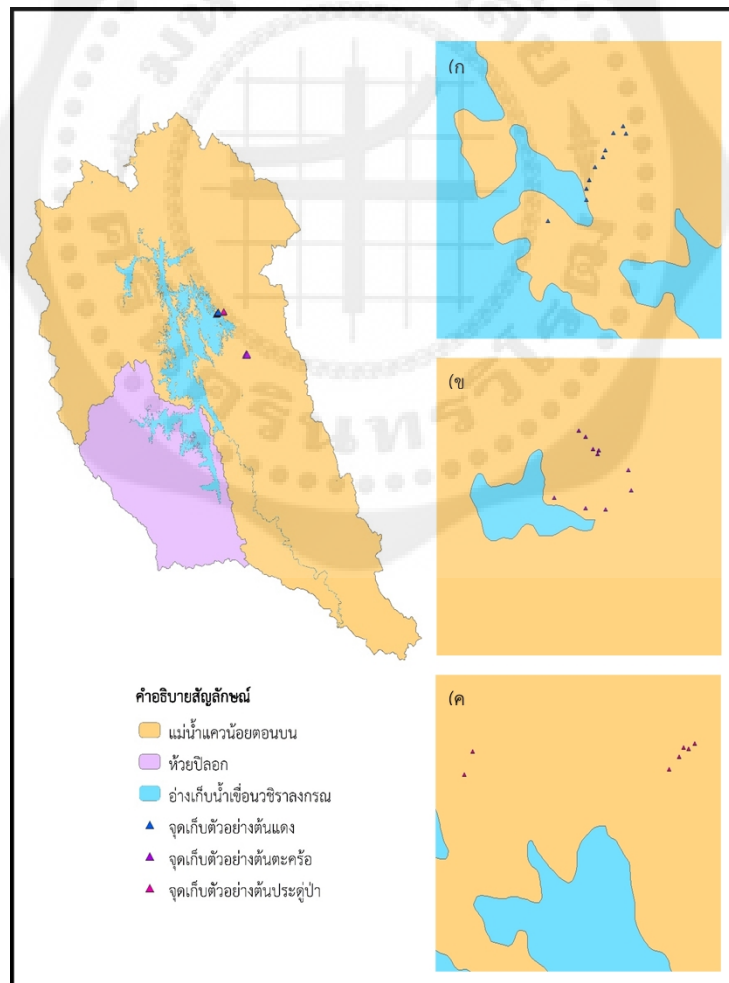
|       |             |   |
|-------|-------------|---|
| เมื่อ | $N_u^{(g)}$ | คือ ปริมาณไนโตรเจนที่ใช้เพื่อการเจริญเติบโต ( $eq/m^2/yr$ ) |
|       | $k_{gr}$    | คือ อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อปี ( $m^3/m^2/yr$ )         |
|       | $\rho$      | คือ ความหนาแน่นของเนื้อไม้ ( $kg/m^3$ )                     |
|       | NPP         | คือ ผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิของป่า ( $kg/m^2/yr$ )            |
|       | $ctX_{st}$  | คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในเนื้อไม้บริเวณลำต้น ( $eq/kg$ ) |
|       | $ctX_{br}$  | คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในกิ่ง ( $eq/kg$ )                |
|       | $f_{br-st}$ | คือ สัดส่วนของกิ่งต่อลำต้น                                  |

7.1 การเลือกตัวอย่างพรรณไม้ การเก็บตัวอย่างพืชเพื่อทำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนที่ใช้เพื่อการเจริญเติบโต จะเลือกเก็บตัวอย่างต้นไม้ที่เป็นไม้เด่น (Dominant species) ของป่าเบญจพรรณในพื้นที่ลุ่มน้ำ จากการศึกษาของ ภาณุมาศ ลาดपालะ และสำเร็จ ปานอุทัย. 2549 พบว่าไม้เด่นที่มีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศวิทยา (Important value) สูงในอันดับ 1 - 3 ได้แก่ ประดู่ป่า (*Pterocarpus macrocarpus*), แดง (*Xylia xylocarpa*) และ ตะคร้อ (*Schleichera oleosa*) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกเก็บพืชเด่นทั้ง 3 ชนิดดังกล่าว เพื่อเป็นตัวแทนป่าเบญจพรรณของพื้นที่ลุ่มน้ำ

7.2 วิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างพืช โดยเลือกการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยเลือกเก็บตัวอย่างพืชเด่น ได้แก่ ประดู่ป่า แดง และตะคร้อ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ (ลุ่มน้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอก) โดยกำหนดแนวเส้นทางศึกษา 3 เส้นทาง (ภาพประกอบ 12) กำหนดให้จุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดเริ่มต้นและเดินไปตามทิศที่กำหนดเป็นระยะทาง 500 เมตร โดยใช้เข็มทิศ และกำหนดจุดเก็บตัวอย่างพืชทั้งหมด 10 จุด ห่างกันจุดละ 50 เมตร (ภาพประกอบ 13) โดยเก็บตัวอย่างเนื้อไม้บริเวณลำต้นและกิ่ง จากต้นที่เส้นทางศึกษาสัมผัสหรือต้นที่ใกล้เส้นทางศึกษามากที่สุด (ภาพประกอบ 14) แต่ละเส้นทางเก็บตัวอย่างพืช 1 ชนิด คือ เส้นทางประดู่ป่า เส้นทางแดง และเส้นทางตะคร้อ เมื่อสุ่มเก็บตัวอย่างพืชแต่ละชนิดครบ 10 จุด นำตัวอย่างส่วนเนื้อไม้บริเวณลำต้น และกิ่งของพืชในแต่ละเส้นทางศึกษารวมกัน เพื่อเป็นตัวแทนของเนื้อไม้บริเวณลำต้นและกิ่งของพืชแต่ละชนิด ดังนั้นพืชแต่ละชนิดจะมีตัวอย่างเนื้อไม้บริเวณลำต้น 1 ตัวอย่างและกิ่ง 1 ตัวอย่าง



ภาพประกอบ 12 เส้นทางเก็บตัวอย่างพืช : ประจูดูป่า แดง และตะคร้อ



ภาพประกอบ 13 จุดเก็บตัวอย่างของพืชแต่ละชนิด : (ก) ต้นแดง, (ข) ตะคร้อ, (ค) ประจูดูป่า



ภาพประกอบ 14 วิธีการเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนของพืช : (ก) เนื้อไม้บริเวณลำต้น, (ข) กิ่ง

### 7.3 การเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) การเตรียมตัวอย่าง นำตัวอย่างพืชไปผึ่งให้แห้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 65-75 องศาเซลเซียส ประมาณ 48 ชั่วโมง บด (milling) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร
- 2) การวิเคราะห์ตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักพืชตัวอย่าง และนำไปย่อย (digestion) ด้วยกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ในพืช ให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี micro kjoldhal method

### 8. Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ (N<sub>i</sub>)

ในประเทศไทยยังไม่มีกรรายงานข้อมูล Nitrogen immobilization ของชุดดินต่างๆ ดังนั้นในการกำหนดค่า Nitrogen immobilization (N<sub>i</sub>) ในการศึกษาี้ เลือกใช้ข้อมูลหตุยภูมิที่ได้จากการศึกษาค่า Nitrogen immobilization ของดินชนิดต่างๆ ตามระบบการจำแนกดินของประเทศอังกฤษ ดังตาราง 4 (บทที่ 2) โดยนำข้อมูลหตุยภูมิที่ได้จากการรวบรวมมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดค่า Nitrogen immobilization ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในครั้งนี้มากที่สุด

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การศึกษาความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดิน (Critical load) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี The First-order acidity balance (FAB) model ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมสำหรับแหล่งน้ำผิวดินในประเทศไทยที่มีข้อมูลพื้นฐานจำกัด สมการที่ใช้ในการคำนวณ critical load ด้วยวิธี FAB model มีดังนี้

$$N_{dep} + S_{dep}^* = fN_{upt} + (1 - r)(N_i + N_{de}) + rN_{ret} + rS_{ret} + Q([BC]_0^* - [ANC]_{limit}) \dots (63)$$

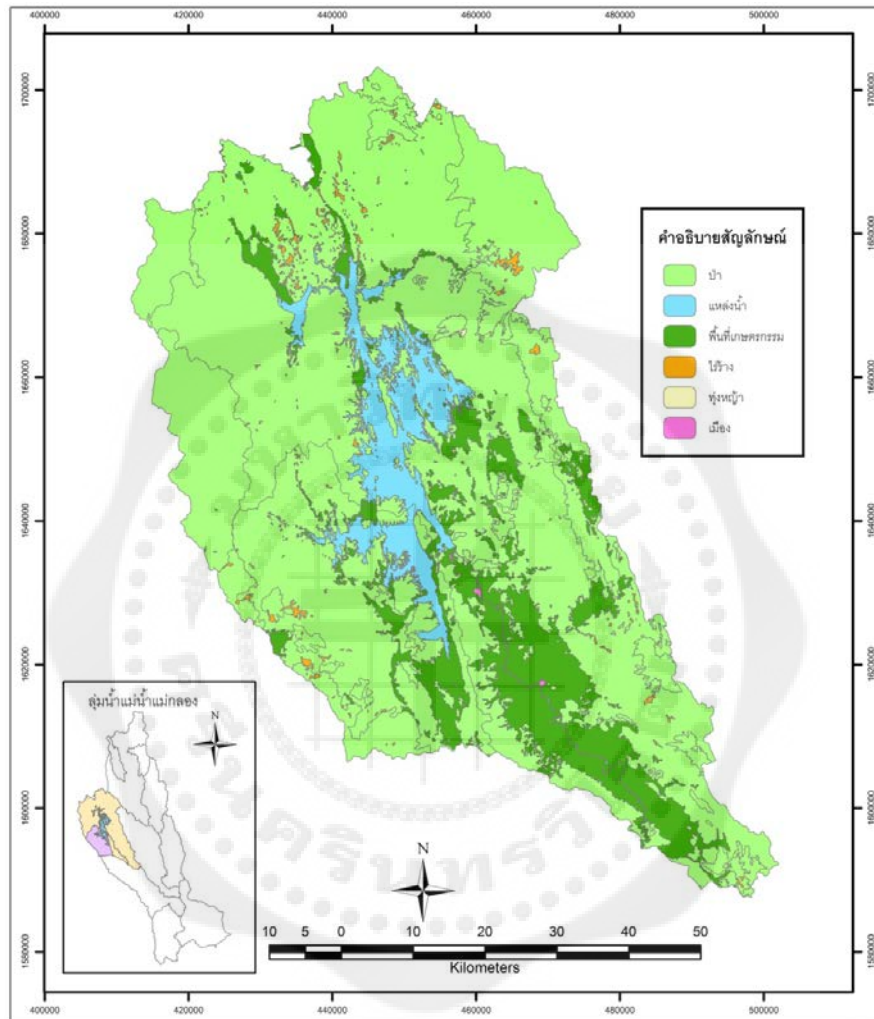
การคำนวณค่า critical load โดยวิธี FAB model ด้วยสมการที่ 63 มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการประเมินค่า critical load และผลการคำนวณค่า critical load ของกรดในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ซึ่งสามารถแบ่งพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ข้อมูลโดยตรง (direct data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถวัดหรือรวบรวมได้โดยตรงจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิต่างๆ ได้แก่ พื้นที่ลุ่มน้ำ, พื้นที่แหล่งน้ำผิวดิน (อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ), พื้นที่ป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ, การตกสะสมของซัลเฟตและไนโตรเจน ( $S_{dep}^*$ ,  $N_{dep}$ ), และน้ำท่ารายปี (Q) และ 2) ข้อมูลโดยอ้อม (indirect data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงใช้การประเมินจากข้อมูลแวดล้อมอื่นๆ ได้แก่ ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ), Nitrogen immobilization ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ ( $N_i$ ), ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification ( $N_{de}$ ), การเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำ ( $S_{ret}$ ), การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ ( $N_{ret}$ ), ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ) และ Acid Neutralization Capacity limit ( $ANC_{limit}$ ) การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งจากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลและการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ มีดังนี้

#### การประเมินพารามิเตอร์ในการคำนวณความสามารถในการรองรับกรด

##### 1. ข้อมูลโดยตรง (direct data)

1.1 พื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่ป่าในลุ่มน้ำ และพื้นที่อ่างเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำแม่กลอง โดยพื้นที่ลุ่มน้ำอ่างเก็บน้ำวชิราลงกรณประกอบด้วยลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและห้วยปีลอก ดังแสดงในภาพประกอบ 9 ซึ่งพื้นที่ลุ่มน้ำดังกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการประเมินความสามารถในการรองรับกรดด้วยวิธี FAB model เนื่องจากวิธีการดังกล่าวต้องการข้อมูลพื้นที่ป่าไม่ทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำ เนื่องจากป่าไม้เป็นแหล่งรองรับการตกสะสมของไนโตรเจนที่สำคัญ เมื่อประมวลข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (ข้อมูลจากกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช ปี 2543) ด้วยโปรแกรม AcrMap GIS เพื่อหาขนาดของพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปีลอก และพื้นที่ป่าไม้ในพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังภาพประกอบ 15 โดยลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อย

ตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกมีพื้นที่ทั้งหมด 5,068 ตารางกิโลเมตร และมีพื้นที่ป่าทั้งหมด 3,959 ตารางกิโลเมตร ซึ่งป่าส่วนใหญ่เป็นป่าเบญจพรรณ (ดังภาพประกอบ 10) และจากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พบว่า เขื่อนวชิราลงกรณ์มีพื้นที่อ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อน 388 ตารางกิโลเมตร

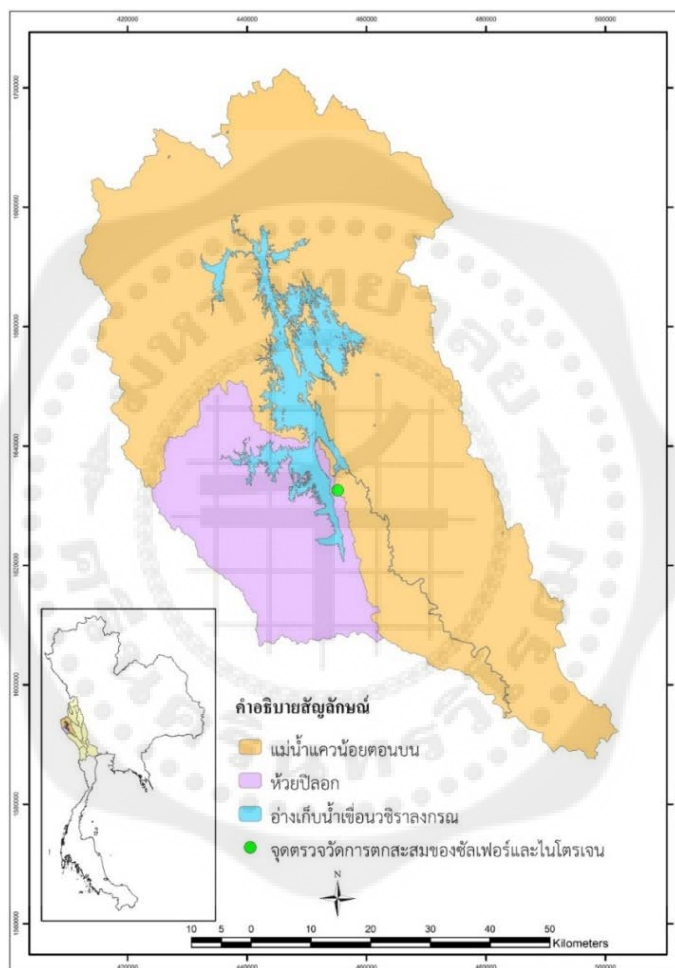


ภาพประกอบ 15 พื้นที่ป่าในลุ่มน้ำแม่ น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอก

ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช ปี 2543

1.2 การตกสะสมของซัลเฟอร์ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเลและการตกสะสมของไนโตรเจน ( $S_{dep}$ ,  $N_{dep}$ ) ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง จากโครงการ Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET ซึ่งเป็นโครงการที่ดำเนินการร่วมกัน 13 ประเทศ รวมถึงประเทศไทยด้วย สำหรับประเทศไทยได้ตั้งจุดตรวจวัดการตกสะสมของกรด 6 แห่ง ได้แก่ กรุงเทพมหานคร, ปทุมธานี, สมุทรปราการ,

กาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ), เชียงใหม่ (แม่เหียะ) และ นครราชสีมา ในการศึกษาี้ได้รวบรวมข้อมูลการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ที่จุดตรวจวัด กาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ) ซึ่งตั้งอยู่ที่ Latitude : 14°46'N Longitude : 98°35'E (ภาพประกอบ 16) การรวบรวมข้อมูลพบว่า จุดตรวจวัดกาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ) ได้เริ่มดำเนินการตรวจวัดการตกสะสมของกรดแบบเปียกตั้งแต่ ปี 2543 ส่วนการตกสะสมของกรดแบบแห้งเริ่มดำเนินการตรวจวัดตั้งแต่ปี 2547 ดังแสดงในตาราง 5



ภาพประกอบ 16 จุดตรวจวัดการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน บริเวณเขื่อนวชิราลงกรณ

ที่มา: Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET

ตาราง 5 ปริมาณการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนแบบเปียกและแบบแห้งในปี

พ.ศ. 2543 – 2558

หน่วย: meq/m<sup>2</sup>/yr

| ปี พ.ศ. | Annual Sulfur  |                | Annual Nitrogen          |                          |
|---------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
|         | Wet Deposition | Wet Deposition | Dry Deposition           | Dry Deposition           |
| 2543    | 6.422          | 5.061          |                          |                          |
| 2544    | 15.828         | 10.234         |                          |                          |
| 2545    | 24             | 13.325         |                          |                          |
| 2546    | 11.57          | 7.96           |                          |                          |
| 2547    | 9.422          | 6.648          | 1.165 x 10 <sup>-4</sup> | 9.355 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2548    | 11.44          | 5.114          | 3.099 x 10 <sup>-6</sup> | 9.677 x 10 <sup>-7</sup> |
| 2549    | 20             | 15.475         | 5.705 x 10 <sup>-5</sup> | 1.484 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2550    | 8.404          | 5.01           | 6.740 x 10 <sup>-5</sup> | 1.556 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2551    | 14.814         | 9.846          | 5.281 x 10 <sup>-5</sup> | 2.483 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2552    | 14.386         | 9.099          | 2.759 x 10 <sup>-5</sup> | 5.733 x 10 <sup>-5</sup> |
| 2553    | 5.822          | 6.111          | 6.009 x 10 <sup>-6</sup> | 1.048 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2554    | 19.854         | 14.114         | 4.333 x 10 <sup>-5</sup> | 6.215 x 10 <sup>-7</sup> |
| 2555    | 17.786         | 16.388         | 4.874 x 10 <sup>-5</sup> | 1.614 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2556    | 3.684          | 2.898          | 2.915 x 10 <sup>-5</sup> | 1.774 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2557    | 7.024          | 4.583          | 6.642 x 10 <sup>-5</sup> | 2.742 x 10 <sup>-6</sup> |
| 2558    | 4.685          | 4.28           | 4.102 x 10 <sup>-5</sup> | 3.226 x 10 <sup>-6</sup> |
| เฉลี่ย  | 12.196         | 8.509          | 4.659 x 10 <sup>-5</sup> | 7.017 x 10 <sup>-6</sup> |

ที่มา: Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: EANET

การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ประกอบด้วยการตกสะสมแบบแห้งและแบบเปียก ซึ่งจากตาราง 5 สามารถคำนวณหาค่าการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน โดยอาศัยสมการดังนี้

$$\text{Deposition} = \text{Wet Deposition} + \text{Dry Deposition} \quad \dots\dots\dots(64)$$

กล่าวคือ จากข้อมูลในตาราง 5 สามารถประเมินค่าการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนได้เท่ากับ 121.96 eq/ha/yr และ 85.09 eq/ha/yr ตามลำดับ

1.3 น้ำท่ารายปี (Q) ในการศึกษาที่ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนนริขารลงกรณ (water inflow) จากโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนนริขารลงกรณ,การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย อ่างเก็บน้ำเขื่อนนริขารลงกรณมีการดำเนินการก่อสร้างเสร็จช่วงปี พ.ศ. 2527 ดังนั้นข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนนริขารลงกรณที่ได้จากการรวบรวมจะอยู่ในช่วงปี พ.ศ. 2543 – 2558 ดังตาราง 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนนริขารลงกรณเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2543 – 2558 มีค่า 5,830.71 ล้านลูกบาศก์เมตร และอ่างเก็บน้ำเขื่อนนริขารลงกรณซึ่งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกจะมีพื้นที่ลุ่มน้ำรวม 5,068 ตารางกิโลเมตร ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยได้เท่ากับ 1.15 m/yr



ตาราง 6 ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยช่วงปี พ.ศ. 2528 – 2558

| ปี   | ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อน (MCM.) |       |       |        |        |          |          |          |          |          |        |        |          | น้ำท่ารายปี<br>(m/yr) |
|------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|-----------------------|
|      | ม.ค.                          | ก.พ.  | มี.ค. | เม.ย.  | พ.ค.   | มิ.ย.    | ก.ค.     | ส.ค.     | ก.ย.     | ต.ค.     | พ.ย.   | ธ.ค.   | ทั้งหมด  |                       |
| 2543 | 71.25                         | 74.80 | 51.47 | 120.76 | 366.73 | 638.31   | 1,121.55 | 1,018.70 | 1,523.75 | 692.79   | 186.34 | 96.75  | 5,963.19 | 1.18                  |
| 2544 | 65.74                         | 37.82 | 60.45 | 37.73  | 181.42 | 419.58   | 1,380.77 | 1,787.62 | 948.94   | 532.70   | 132.33 | 84.91  | 5,669.99 | 1.12                  |
| 2545 | 63.45                         | 30.05 | 20.94 | 54.21  | 497.48 | 502.52   | 1,734.85 | 2,428.53 | 1,980.66 | 461.23   | 187.81 | 113.81 | 8,075.54 | 1.59                  |
| 2546 | 40.62                         | 40.71 | 58.90 | 14.00  | 118.46 | 357.93   | 1,219.44 | 1,355.63 | 1,142.44 | 466.62   | 116.17 | 48.56  | 4,979.49 | 0.98                  |
| 2547 | 47.53                         | 21.75 | 21.66 | 2.71   | 393.73 | 1,011.64 | 670.53   | 1,689.29 | 707.61   | 192.00   | 42.79  | 33.81  | 4,835.05 | 0.95                  |
| 2548 | 34.37                         | 18.08 | 13.65 | 5.01   | 56.46  | 306.27   | 1,429.79 | 2,188.22 | 1,186.37 | 489.27   | 211.61 | 66.59  | 6,005.68 | 1.19                  |
| 2549 | 47.64                         | 34.46 | 21.85 | 71.38  | 329.85 | 466.13   | 2,391.28 | 2,718.76 | 758.78   | 500.78   | 123.51 | 50.97  | 7,515.37 | 1.48                  |
| 2550 | 42.16                         | 24.42 | 15.03 | 9.39   | 106.94 | 215.51   | 1,312.07 | 2,017.51 | 916.96   | 1,040.98 | 136.81 | 70.99  | 5,908.76 | 1.17                  |
| 2551 | 45.23                         | 23.93 | 24.42 | 29.08  | 426.09 | 567.42   | 863.84   | 2,235.55 | 970.46   | 485.04   | 255.67 | 103.68 | 6,030.40 | 1.19                  |
| 2552 | 45.57                         | 29.64 | 4.23  | 30.44  | 117.64 | 742.99   | 1,892.47 | 1,888.22 | 1,124.61 | 932.72   | 195.11 | 78.02  | 7,081.66 | 1.40                  |
| 2553 | 77.78                         | 18.61 | 1.78  | 10.51  | 17.49  | 73.23    | 281.94   | 690.68   | 766.87   | 67.72    | 101.38 | 391.94 | 2,499.93 | 0.49                  |
| 2554 | 39.06                         | 16.25 | 71.19 | 62.91  | 185.89 | 837.52   | 1,500.34 | 1,858.39 | 1,576.92 | 694.91   | 151.76 | 50.20  | 7,045.34 | 1.39                  |
| 2555 | 45.30                         | 31.76 | 21.60 | 8.43   | 83.51  | 927.14   | 1,716.81 | 2,288.30 | 1,597.10 | 593.18   | 179.25 | 80.98  | 7,573.37 | 1.49                  |
| 2556 | 52.24                         | 29.36 | 36.57 | 12.40  | 11.29  | 333.51   | 1,707.37 | 1,486.90 | 1,559.42 | 641.34   | 192.48 | 77.21  | 6,140.08 | 1.21                  |
| 2557 | 37.85                         | 22.62 | 23.88 | 15.22  | 8.46   | 188.08   | 671.08   | 938.53   | 923.97   | 416.43   | 176.11 | 72.92  | 3,495.17 | 0.69                  |
| 2558 | 58.56                         | 29.91 | 44.42 | 21.10  | 62.97  | 405.01   | 932.78   | 1,166.04 | 850.99   | 648.15   | 165.13 | 87.21  | 4,472.27 | 0.88                  |

ที่มา: ปรับปรุงจาก โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

## 2. ข้อมูลโดยอ้อม (indirect data)

2.1 ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ) การประมาณค่าการดูดซึมไนโตรเจนสุทธิของพืชจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ประเภทของป่า ทำให้ค่า  $N_{upt}$  เป็นค่าเฉพาะของป่าแต่ละประเภท ในการศึกษาที่ใช้สมมุติฐานว่าการดูดซึมไนโตรเจนของพืชสุทธิคือปริมาณไนโตรเจนที่สะสมไว้ในเนื้อไม้ ในการศึกษาที่ใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชเพื่อประเมินปริมาณไนโตรเจนที่พืชดูดซึม (uptake) โดยการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) จากส่วนต่าง ๆ ของพืชเพื่อประเมินปริมาณไนโตรเจนที่พืชดูดซึมไปใช้และสะสมอยู่ในส่วนต่างๆของพืช โดยจะพิจารณาเฉพาะ ลำต้นและกิ่ง เท่านั้น เนื่องจากสภาพป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษาเป็นป่าเบญจพรรณซึ่งจัดอยู่ในป่าประเภทป่าผลัดใบ สามารถคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนที่ใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$N_u^{(g)} = NPP \times (ctX_{st} + f_{br-st} \times ctX_{br}) \quad \dots\dots\dots(65)$$

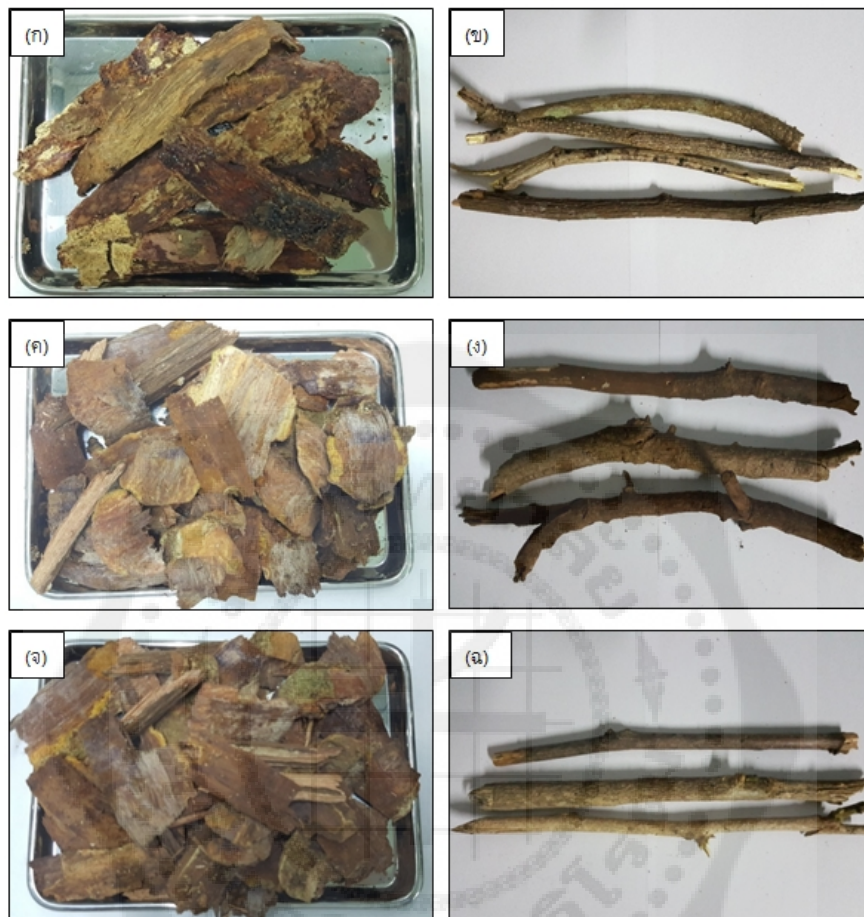
การหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อของพืช โดยการเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนลำต้นและกิ่งของพืชเด่น ได้แก่ ต้นแดง ต้นประดู่ป่า และต้นตะคร้อ บริเวณพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาแหลมซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ น้ำแควน้อยตอนบน ชิ้นส่วนของเนื้อไม้บริเวณลำต้นและกิ่งของต้นแดง ประดู่ป่า และตะคร้อจากการสุ่มเก็บตัวอย่าง (ดังภาพประกอบ 17) นำไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี kjoldhal method โดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อไม้บริเวณลำต้นและกิ่งของพืชแต่ละชนิดแสดงดังตาราง 7

ตาราง 7 ปริมาณไนโตรเจนในลำต้นและกิ่งของพืชแต่ละชนิด

| พืช       | ความเข้มข้นของ N ในเนื้อไม้บริเวณ |                                  |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|
|           | ลำต้น (meq/kg)                    | ความเข้มข้นของ N ในกิ่ง (meq/kg) |
| แดง       | 1,136.675                         | 456.340                          |
| ประดู่ป่า | 635.300                           | 190.857                          |
| ตะคร้อ    | 487.321                           | 95.312                           |
| เจ็ลี่ย   | 753.099                           | 247.503                          |

การคำนวณค่าไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ) ตามสมการที่ 65 จำเป็นต้องอาศัยข้อมูล ผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิ (Net Primary Production) และค่าสัดส่วนของกิ่งต่อลำต้น และการศึกษาจึงเลือกใช้ข้อมูลทุติยภูมิ โดยใช้ข้อมูลผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิจากการศึกษาของ สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ และคนอื่นๆ. 2548 ซึ่งผลการศึกษาพบว่าผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิของป่าเบญจพรรณลุ่มน้ำแม่กลอง เท่ากับ 12.34 ton/ha/yr หรือ 1.234 kg/m<sup>2</sup>/yr และค่าสัดส่วนของกิ่งต่อเนื้อไม้บริเวณลำต้น ใช้ข้อมูลจากการศึกษาของ จิรพันธ์ วีระกุลพิศุทธิ์; และ

นันทนา คชเสนี. 2547 พบว่ามวลชีวภาพของป่าเบญจพรรณในพื้นที่ป่าทองผาภูมิ (โปรงพุ่ม) มีค่าแสดงดังตาราง 8 ดังนั้น ค่าสัดส่วนของกิ่งต่อเนื้อไม้บริเวณลำต้น มีค่าเท่ากับ 0.278



ภาพประกอบ 17 ตัวอย่างชิ้นส่วนของพืช : (ก) เนื้อไม้บริเวณลำต้นของแดง, (ข) กิ่งของแดง, (ค) เนื้อไม้บริเวณลำต้นของประดู่ป่า, (ง) กิ่งของประดู่ป่า, (จ) เนื้อไม้บริเวณลำต้นของตะคร้อ, (ฉ) กิ่งของตะคร้อ

การคำนวณค่าไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ( $N_{upt}$ ) ตามสมการที่ 65 จะพบว่า ต้นแดง ต้นประดู่ และต้นตะคร้อ มีค่า  $N_{upt}$  เท่ากับ 1.53, 0.84 และ 0.63 eq/m<sup>2</sup>/yr ตามลำดับ ดังตาราง 9 ดังนั้นป่าเบญจพรรณในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกมีค่าไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เท่ากับ 9,980 eq/ha/yr

ตาราง 8 มวลชีวภาพของป่าเบญจพรรณในพื้นที่ป่าทองผาภูมิ (โปร่งพรุอ่อน)

| มวลของส่วนต่างๆของต้นไม้ | น้ำหนัก (ton/ha) |
|--------------------------|------------------|
| มวลของลำต้น              | 110.256±50.63    |
| มวลของกิ่ง               | 30.657±29.96     |
| มวลของใบ                 | 0.151±0.005      |
| รวม                      | 96.28±33.44      |

ที่มา: จิรพันธ์ วีระกุลพิศุทธิ์; และ นันทนา คชเสนี. 2547

ตาราง 9 การประมาณค่า Nitrogen uptake ของพืชแต่ละชนิด

| ตัวอย่าง  | ความเข้มข้นของ N ในลำต้น<br>(eq/kg) | ความเข้มข้นของ N ในกิ่ง<br>(eq/kg) | N <sub>upt</sub><br>(eq/m <sup>2</sup> /yr) |
|-----------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| แดง       | 1.14                                | 0.46                               | 1.53  |
| ประดู่ป่า | 0.64                                | 0.19                               | 0.84  |
| ตะคร้อ    | 0.49                                | 0.10                               | 0.63  |
| เจดีย์    |                                     |                                    | 0.998                                       |

2.2 Nitrogen immobilization (N<sub>i</sub>) ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ การประเมินค่า Nitrogen immobilization ในการศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากการศึกษาค่า Nitrogen immobilization ของดินชนิดต่างๆ ตามระบบการจำแนกดินของประเทศอังกฤษ ซึ่งจากการศึกษาค่า Nitrogen immobilization ของดินแต่ละชนิดตามตาราง 4 พบว่า ดินแต่ละชนิดมีค่า Nitrogen immobilization เท่ากับ 0.2143 และ 0.0714 keq/ha/yr ในการศึกษารั้งนี้ เลือกใช้ค่า Nitrogen immobilization เท่ากับ 0.0714 keq/ha/yr จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเลือกค่าดังกล่าวมาใช้พบว่า กระบวนการ immobilization ของไนโตรเจนเป็นการเปลี่ยนไนโตรเจนในรูปสารประกอบอินทรีย์ (แอมโมเนียม และไนเตรท) ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ (organic N) ซึ่ง Nitrogen immobilization ถือเป็นแหล่งรองรับการตกสะสมกรตอย่างหนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้ค่า Nitrogen immobilization เท่ากับ 0.0714 keq/ha/yr จึงถือว่ามีความปลอดภัยต่อแหล่งน้ำผิวดินและป้องกันไม่ให้เกิดการคำนวณค่า critical load มีค่ามากเกินไป (overestimated)

2.3 ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification (N<sub>de</sub>) การประเมินค่า ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 66 ซึ่งการคำนวณค่า N<sub>de</sub> พบว่ามีพารามิเตอร์ที่ต้องประเมินเพิ่มเติมได้แก่ สัดส่วนของพื้นที่ป่าพรุในพื้นที่ลุ่ม

น้ำ ซึ่งจากข้อมูลกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช (ภาพประกอบ 10) พบว่า สภาพป่าบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำแควน้อยตอนบนและห้วยปิลอก ไม่พบป่าพรุ ดังนั้น  $f_{peat}$  มีค่าเท่ากับ 0

$$N_{de} = f_{de} \times (N_{dep} - N_i - N_{upt}) \quad \dots\dots\dots(66)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า ไนโตรเจนที่สูญเสียไปจากกระบวนการ Denitrification ( $N_{de}$ ) ตามสมการที่ 66 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} N_{de} &= (0.1 + 0.7 \times 0) \times (85.09 \text{ eq/ha/yr} - 71.4 \text{ eq/ha/yr} - 9,980 \text{ eq/ha/yr}) \\ &= -996.76 \text{ eq/ha/yr} \end{aligned}$$

2.4 การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ ( $S_{ret}$ ) โดยที่การเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำเป็นสัดส่วนกับปริมาณซัลเฟตที่เข้าสู่แหล่งน้ำสุทธิ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการได้ดังนี้

$$rS_{ret} = \rho_s \times S_{dep}^* \quad \dots\dots\dots(67)$$

จากสมการประเมินค่าการเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ พบว่ามีพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณ 2 พารามิเตอร์ได้แก่ การตกสะสมของซัลเฟอร์ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล มีค่าเท่ากับ  $12.2 \text{ meq/m}^2/\text{yr}$  และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต มีค่า  $5 \text{ m/yr}$  ดังนั้นปัจจัยการเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำ ( $\rho_s$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ kinetic ดังนี้

$$\rho_s = \frac{S_s}{S_s + Q/r} \quad \dots\dots\dots(68)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับอัตราการกำจัดซัลเฟตสุทธิในตะกอนดินและความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเหนือผิวตะกอนดิน สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาค่า  $S_s$  ของแหล่งน้ำผิวดิน สำหรับในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลทุติยภูมิ โดยกำหนดให้  $S_s$  เท่ากับ  $0.5 \text{ m/yr}$  ดังนั้นสามารถคำนวณค่า ปัจจัยการเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำ ( $\rho_s$ ) ได้เท่ากับ 0.032 ดังนั้นอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์มีค่าการเก็บกักซัลเฟอร์ในแหล่งน้ำ ( $S_{ret}$ ) เท่ากับ  $3.95 \text{ eq/ha/yr}$

2.5 การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ ( $N_{ret}$ ) ไนโตรเจนที่อยู่ในแหล่งน้ำบางส่วนจะถูกเก็บกักไว้ในแหล่งน้ำโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนดินใต้ท้องน้ำ โดยการเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่แหล่งน้ำสุทธิ สามารถคำนวณ  $N_{ret}$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$rN_{ret} = \rho_N [N_{dep} - fN_{upt} - (1 - r)(N_i + N_{de})] \quad \dots\dots\dots(69)$$

สมการสำหรับประเมินค่า การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ ประกอบด้วยปริมาณไนโตรเจนสุทธิซึ่ง ได้แก่ ผลต่างระหว่างไนโตรเจนจากแหล่งกำเนิด ( $N_{dep}$ ) และไนโตรเจนที่ถูกใช้ไปโดยแหล่งรองรับไนโตรเจน ( $N_{upt}$ ,  $N_i$  และ  $N_{de}$ ) และปัจจัยการเก็บกักไนเตรทในแหล่งน้ำ ( $\rho_N$ ) ซึ่งสามารถคำนวณ  $\rho_N$  ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\rho_N = \frac{S_N}{S_N + Q/r} \quad \dots\dots\dots(70)$$

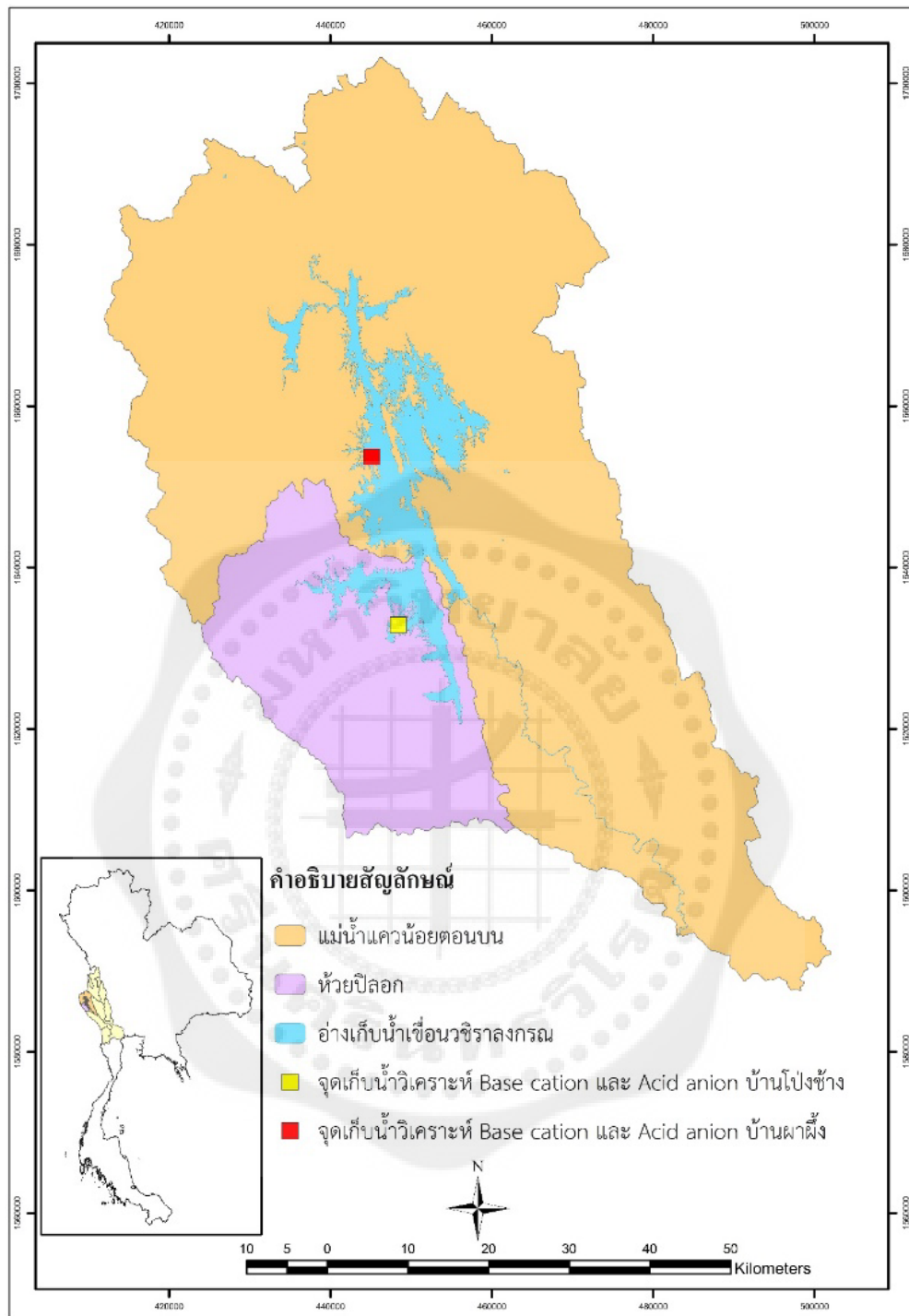
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ ) เกี่ยวข้องกับอัตราการกำจัดไนเตรทสุทธิและความเข้มข้นของไนเตรท สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการศึกษา จึงเลือกใช้ค่า  $S_N$  เท่ากับ 5 m/yr ซึ่งได้จากการศึกษา  $S_N$  ในทะเลสาบ 302N ปี 1982-1985 จากสมการที่ (70) ค่าปัจจัยการเก็บกักไนเตรทในแหล่งน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.251 ดังนั้นอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ความสามารถเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ ( $rN_{ret}$ ) ได้เท่ากับ -1716.58 eq/ha/yr ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่แหล่งน้ำถูกนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ จนหมดและไม่ถูกกักเก็บอยู่ในแหล่งน้ำ

2.6 ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ) คือความเข้มข้นของ Base cation ในแหล่งน้ำผิวดินช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ประกอบด้วยความเข้มข้นของ  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$   $Na^+$  และ  $K^+$  โดย  $[BC]_0^*$  เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญในการคำนวณค่า critical load เนื่องจาก ค่า  $[BC]_0^*$  เป็นศักยภาพตามธรรมชาติของแหล่งน้ำเองในการสะเทินกรด ซึ่งจากข้อมูลการจดทะเบียนเพื่อขออนุญาตประกอบกิจการ ในจังหวัดกาญจนบุรี พบว่าเริ่มมีการขออนุญาตประกอบกิจการปี 2511 ดังนั้นจึงกำหนดให้ช่วงเวลาก่อนอุตสาหกรรมของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ คือ ปี 2511 สำหรับประเทศไทยที่ไม่ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ base cation และ acid anion อยู่ในมาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้ข้อมูลดังกล่าวไม่มีการรายงานไว้ ดังนั้นจึงอาศัยข้อมูลความเข้มข้นของ base cation และ acid anion ณ ช่วงเวลาปัจจุบัน เพื่อประเมินค่า  $[BC]_0^*$  โดยใช้สมการดังสมการต่อไปนี้

$$[BC]_0^* = [BC]_t^* - F([SO_4^{2-}]_t^* + [NO_3^-]_t - [SO_4^{2-}]_0^* - [NO_3^-]_0) \dots \dots \dots (71)$$

จากสมการดังกล่าวพบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่า ความเข้มข้นของ base cation ก่อนอุตสาหกรรมที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเล สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

2.6.1 ความเข้มข้นของ base cation และ acid anion ในแหล่งน้ำผิวดิน ณ ช่วงเวลาปัจจุบัน จากการรวบรวมข้อมูล base cation และ acid anion ในแหล่งน้ำผิวดินพบว่าประเทศไทยได้มีการจัดตั้งโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย ที่ดำเนินการโดย สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ โดยโครงการนี้ได้เริ่มดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินในปี 2543 จนถึงปัจจุบัน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินในหลายๆ พารามิเตอร์ รวมทั้งความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ได้แก่  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$   $Na^+$   $K^+$   $SO_4^{2-}$  และ  $NO_3^-$  ซึ่งเป็นข้อมูลจำเป็นสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ โครงการนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อการวิเคราะห์ 2 จุด ได้แก่ บ้านผาผึ้ง (BPP) และ บ้านโป่งช้าง(BPC) ที่ตั้งอยู่ที่พิกัด Latitude : 14°95'N Longitude : 98°48'E และ Latitude : 14° 76'N Longitude : 98°52'E ตามลำดับ (ภาพประกอบ18) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ ในปี 2558 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[BC]_0^*$ ) ดังตาราง 10



ภาพประกอบ 18 จุดตรวจวัดความเข้มข้นของ base cation และ acid anion ในโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย

ตาราง 10 ความเข้มข้นของ base cation และ acid anion ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี พ.ศ. 2558

| Date       | Station | Acid anion (meq/liter) |                                 |                                  | Base cation (meq/liter) |                     |                     |                    |
|------------|---------|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|            |         | [Cl <sup>-</sup> ]     | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] | [K <sup>+</sup> ]       | [Ca <sup>2+</sup> ] | [Mg <sup>2+</sup> ] | [Na <sup>+</sup> ] |
| กุมภาพันธ์ | BPP1    | 0.049                  | <0.0016                         | 0.021                            | 0.025                   | 0.818               | 0.214               | 0.093              |
|            | BPP2    | 0.025                  | <0.0016                         | 0.030                            | 0.024                   | 0.818               | 0.211               | 0.052              |
|            | BPC1    | 0.029                  | <0.0016                         | 0.032                            | 0.023                   | 0.778               | 0.234               | 0.055              |
|            | BPC2    | 0.018                  | <0.0016                         | 0.019                            | 0.023                   | 0.768               | 0.235               | 0.053              |
| พฤษภาคม    | BPP1    | 0.028                  | <0.0016                         | 0.033                            | 0.020                   | 0.778               | 0.225               | 0.083              |
|            | BPP2    | 0.037                  | <0.0016                         | 0.037                            | 0.017                   | 0.699               | 0.203               | 0.043              |
|            | BPC1    | 0.025                  | <0.0016                         | 0.048                            | 0.017                   | 0.739               | 0.248               | 0.036              |
|            | BPC2    | 0.040                  | <0.0016                         | 0.031                            | 0.016                   | 0.709               | 0.243               | 0.042              |
| กรกฎาคม    | BPP1    | 0.025                  | <0.0016                         | 0.035                            | 0.023                   | 0.863               | 0.227               | 0.053              |
|            | BPP2    | 0.025                  | <0.0016                         | 0.032                            | 0.023                   | 0.858               | 0.225               | 0.052              |
|            | BPC1    | 0.023                  | <0.0016                         | 0.027                            | 0.027                   | 0.823               | 0.253               | 0.057              |
|            | BPC2    | 0.026                  | <0.0016                         | 0.029                            | 0.024                   | 0.833               | 0.256               | 0.053              |
| พฤศจิกายน  | BPP1    | 0.021                  | <0.0016                         | 0.024                            | 0.022                   | 0.838               | 0.239               | 0.055              |
|            | BPP2    | 0.017                  | <0.0016                         | 0.022                            | 0.022                   | 0.838               | 0.249               | 0.055              |
|            | BPC1    | 0.025                  | 0.0019                          | 0.026                            | 0.023                   | 0.848               | 0.286               | 0.059              |
|            | BPC2    | 0.023                  | <0.0016                         | 0.027                            | 0.024                   | 0.798               | 0.286               | 0.057              |
| เฉลี่ย     |         | 0.027                  | 0.002                           | 0.030                            | 0.022                   | 0.801               | 0.240               | 0.056              |

ที่มา: โครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ

ความเข้มข้นของ Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> Na<sup>+</sup> K<sup>+</sup> และ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของ base cation ก่อนอุตสาหกรรมจะต้องใช้ค่าความเข้มข้นของอิออนในรูปของ non marine สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 27 - 31 ผลการคำนวณความเข้มข้นของ Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> Na<sup>+</sup> K<sup>+</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ BC<sub>f</sub> ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล แสดงในตาราง 11

ตาราง 11 ความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$   $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{BC}_t^*$  ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเลของ  
อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี พ.ศ. 2558

(หน่วย: meq/ liter)

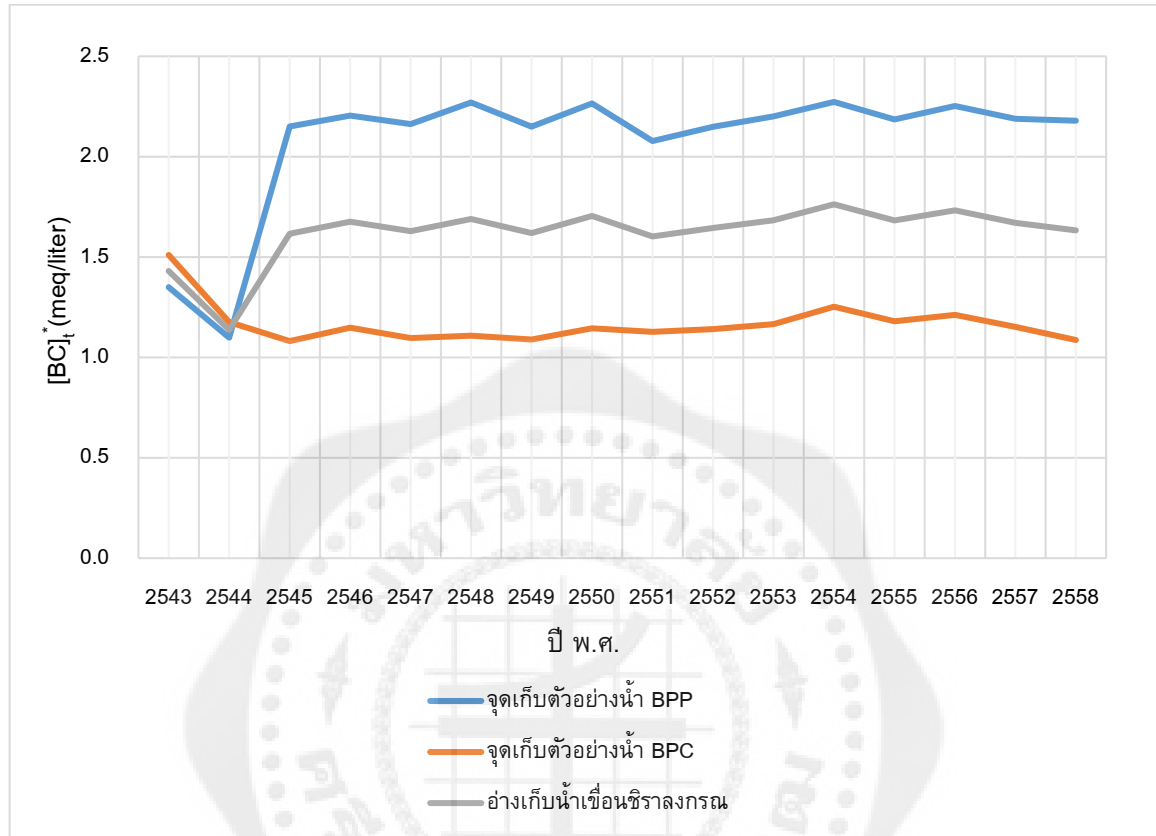
| Date       | Station | $[\text{SO}_4^{2-}]_t^*$ | Base cation        |                        |                        |                     |                   |
|------------|---------|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------|
|            |         |                          | $[\text{K}^+]_t^*$ | $[\text{Ca}^{2+}]_t^*$ | $[\text{Mg}^{2+}]_t^*$ | $[\text{Na}^+]_t^*$ | $[\text{BC}]_t^*$ |
| กุมภาพันธ์ | BPP1    | 0.016                    | 0.024              | 0.817                  | 0.204                  | 0.051               | 1.096             |
|            | BPP2    | 0.028                    | 0.023              | 0.817                  | 0.206                  | 0.031               | 1.077             |
|            | BPC1    | 0.029                    | 0.022              | 0.777                  | 0.229                  | 0.03                | 1.058             |
|            | BPC2    | 0.017                    | 0.023              | 0.768                  | 0.232                  | 0.038               | 1.061             |
| พฤษภาคม    | BPP1    | 0.03                     | 0.02               | 0.777                  | 0.219                  | 0.058               | 1.074             |
|            | BPP2    | 0.034                    | 0.016              | 0.697                  | 0.196                  | 0.012               | 0.921             |
|            | BPC1    | 0.045                    | 0.016              | 0.738                  | 0.243                  | 0.014               | 1.011             |
|            | BPC2    | 0.027                    | 0.015              | 0.707                  | 0.235                  | 0.008               | 0.965             |
| กรกฎาคม    | BPP1    | 0.032                    | 0.023              | 0.862                  | 0.222                  | 0.031               | 1.138             |
|            | BPP2    | 0.029                    | 0.023              | 0.857                  | 0.221                  | 0.031               | 1.132             |
|            | BPC1    | 0.025                    | 0.026              | 0.822                  | 0.248                  | 0.038               | 1.134             |
|            | BPC2    | 0.027                    | 0.024              | 0.832                  | 0.251                  | 0.031               | 1.138             |
| พฤศจิกายน  | BPP1    | 0.022                    | 0.022              | 0.838                  | 0.235                  | 0.038               | 1.133             |
|            | BPP2    | 0.02                     | 0.022              | 0.838                  | 0.246                  | 0.04                | 1.146             |
|            | BPC1    | 0.023                    | 0.023              | 0.847                  | 0.281                  | 0.037               | 1.188             |
|            | BPC2    | 0.025                    | 0.023              | 0.798                  | 0.282                  | 0.037               | 1.14              |
| เฉลี่ย     |         | 0.027                    | 0.022              | 0.800                  | 0.234                  | 0.033               | 1.088             |

ที่มา: โครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย สำนักจัดการ  
คุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ

จากตาราง 11 แสดงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในช่วงเวลาปัจจุบัน ปี พ.ศ.  
2558 สามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ base cation ในเวลาช่วงปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่ได้รับ  
จากทะเล ( $[\text{BC}]_t^*$ ) ได้เท่ากับ 1.088 meq/ liter

ข้อมูล  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  ในแหล่งน้ำผิวดินจากโครงการติดตามตรวจสอบ  
การตกสะสมของกรดในประเทศไทย สามารถประเมินค่าความเข้มข้นของ base cation รายปี ใน  
อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 - 2558 ดังภาพประกอบ 19 ซึ่งแสดงความเข้มข้น

ของ base cation ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[BC]_t^+$ ) ในเวลาต่างๆ โดยมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 2 จุด ได้แก่ บ้านผาผึ้ง (BPP) และ บ้านโป่งช้าง(BPC)



ภาพประกอบ 19 กราฟแนวโน้มความเข้มข้นของ base cation ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[BC]_t^+$ ) ในเวลาต่างๆ

2.6.2 ความเข้มข้นของซัลเฟตช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ( $[SO_4^{2-}]_0$ ) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การคำนวณ ค่า  $[SO_4^{2-}]_0$  จากสมการเชิงเส้น ซึ่งเลือกใช้สมการเชิงเส้นที่ได้ จากการทดลองของ Henriksen and Posch. 2001 เนื่องจากเป็นสมการที่ได้จากการทดลองที่ใช้จำนวนทะเลสาบมากที่สุดและมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด สมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$[SO_4^{2-}]_0 = 8 + 0.17[BC]_t^+ \dots\dots\dots(72)$$

ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลความเข้มข้น base cation ของแหล่งน้ำผิวดิน เขื่อนชีราลงกรม ในช่วงปี 2558 จากโครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย สามารถคำนวณค่า ความเข้มข้นของ base cation ในเวลาช่วงปัจจุบันซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ได้เท่ากับ 1.088 meq/ liter หรือ 1,088 meq/m<sup>3</sup> ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า  $[SO_4^{2-}]_0$  ตามสมการที่ 72 ได้เท่ากับ 193 meq/ m<sup>3</sup> หรือ 0.193 meq/ liter ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 ความเข้มข้นของ  $\text{SO}_4^{2-}$  ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ของอ่างเก็บน้ำ เขื่อนวชิราลงกรณ ปี 2558

| Date       | Station | $[\text{BC}]_t^*$ (meq/ m <sup>3</sup> ) | $[\text{SO}_4^{2-}]_0^*$ (meq/ m <sup>3</sup> ) |
|------------|---------|--|---|
| กุมภาพันธ์ | BPP1    | 1096                                     | 194.32  |
|            | BPP2    | 1077                                     | 191.09  |
|            | BPC1    | 1058                                     | 187.86  |
|            | BPC2    | 1061                                     | 188.37  |
| พฤษภาคม    | BPP1    | 1074                                     | 190.58  |
|            | BPP2    | 921                                      | 164.57  |
|            | BPC1    | 1011                                     | 179.87  |
|            | BPC2    | 965                                      | 172.05  |
| กรกฎาคม    | BPP1    | 1138                                     | 201.46  |
|            | BPP2    | 1132                                     | 200.44  |
|            | BPC1    | 1134                                     | 200.78  |
|            | BPC2    | 1138                                     | 201.46  |
| พฤศจิกายน  | BPP1    | 1133                                     | 200.61  |
|            | BPP2    | 1146                                     | 202.82  |
|            | BPC1    | 1188                                     | 209.96  |
|            | BPC2    | 1140                                     | 201.8   |
| เฉลี่ย     |         | 1088                                     | 193   |

2.6.3 ความเข้มข้นของไนเตรทช่วงก่อนอุตสาหกรรม ( $[\text{NO}_3^-]_0$ ) ช่วงก่อนมีอุตสาหกรรมการตกสะสมของไนเตรทส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติเท่านั้น ซึ่งไนเตรทที่ตกสะสมอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมด้วยพืชไปใช้ในกระบวนการ assimilation เพื่อการเจริญเติบโต และเก็บกักในจุลินทรีย์ในตะกอนดินใต้ท้องน้ำ ทำให้ปริมาณไนเตรทที่อยู่ในแหล่งน้ำช่วงก่อนมีอุตสาหกรรมอยู่ในสภาวะสมดุล อีกทั้งเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอออนแต่ละตัวที่อยู่ในแหล่งน้ำพบว่าความเข้มข้นของไนเตรทน้อยกว่า 0.0016 meq/ liter ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับไอออนตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเข้มข้นของไนเตรทช่วงก่อนอุตสาหกรรมมีค่าเท่ากับ 0

2.6.4 การประเมินค่า F-factor ซึ่ง F-factor คือ อัตราการส่วนของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเข้มข้นของ base cation และ acid aion ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเทียบกับเวลาช่วงก่อนมีอุตสาหกรรม ค่า F สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21 โดยค่า F มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $[\text{BC}]_t > [\text{S}]$  เมื่อ  $[\text{S}]$  เท่ากับ 400  $\mu\text{eq/liter}$  (Hindar A; et al. 2000:

11-12) และจากคำนวณค่าความเข้มข้นของ base cation ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเลมีค่าเท่ากับ 1,088  $\mu\text{eq/liter}$  ดังนั้น ค่า F จึงมีค่าเท่ากับ 1

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ตามสมการที่ 71 ได้เท่ากับ 1.253 meq/ liter หรือ 1.253 eq/m<sup>3</sup> ดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ปี 2558

(หน่วย: meq/ liter)

| Date       | Station | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] <sub>t</sub> | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] <sub>o</sub> | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>t</sub> | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>o</sub> | [BC] <sub>t</sub> | [BC] <sub>o</sub> |
|------------|---------|--|--|---|---|-------------------|-------------------|
| กุมภาพันธ์ | BPP1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.016   | 0.194   | 1.096             | 1.273             |
|            | BPP2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.028   | 0.191   | 1.077             | 1.238             |
|            | BPC1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.029   | 0.188   | 1.058             | 1.215             |
|            | BPC2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.017   | 0.188   | 1.061             | 1.231             |
| พฤษภาคม    | BPP1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.03  | 0.191   | 1.074             | 1.233             |
|            | BPP2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.034   | 0.165   | 0.921             | 1.050             |
|            | BPC1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.045   | 0.180   | 1.011             | 1.144             |
|            | BPC2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.027   | 0.172   | 0.965             | 1.108             |
| กรกฎาคม    | BPP1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.032   | 0.201   | 1.138             | 1.306             |
|            | BPP2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.029   | 0.200   | 1.132             | 1.302             |
|            | BPC1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.025   | 0.201   | 1.134             | 1.308             |
|            | BPC2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.027   | 0.201   | 1.138             | 1.311             |
| พฤศจิกายน  | BPP1    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.022   | 0.201   | 1.133             | 1.310             |
|            | BPP2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.02  | 0.203   | 1.146             | 1.327             |
|            | BPC1    | 0.0019                                       | 0.000  | 0.023   | 0.210   | 1.188             | 1.373             |
|            | BPC2    | 0.0016                                       | 0.000  | 0.025   | 0.202   | 1.14              | 1.315             |
| เฉลี่ย     |         | 0.0016                                       | 0.000  | 0.027   | 0.193   | 1.088             | 1.253             |

2.7 Acid Neutralization Capacity limit ( $\text{ANC}_{\text{limit}}$ ) ในการศึกษาี้เลือกใช้ค่า  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  เท่ากับ 20  $\mu\text{eq/liter}$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันทั่วไปในยุโรป ซึ่งได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดของแหล่งน้ำผิวดินและการสูญเสีย acid neutralization capacity (ANC) ในทะเลสาบของประเทศ Norwegian ซึ่ง  $\text{ANC}_{\text{limit}}$  เท่ากับ 20  $\mu\text{eq/liter}$  เป็นค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อปลาแซลมอนที่เป็น sensitive indicator ซึ่งปลาแซลมอนเป็นปลาน้ำ

กร่อยที่มีความเป็นต่างมากกว่าน้ำจืด ปลาแซลมอนจึงมีความสามารถในการทนกรดได้น้อยกว่า ปลาน้ำจืดที่อยู่ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ดังนั้นการเลือกใช้ค่า  $ANC_{limit}$  เท่ากับ  $20 \mu eq/liter$  จึงถือว่ามีความเหมาะสมและมีปลอดภัยต่อปลาในอ่างเก็บน้ำ

### การประเมินค่า critical load

การศึกษาค่า critical load ของซัลเฟอร์และไนโตรเจนในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ในครั้งนี้ใช้ FAB model ในการคำนวณ ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยสมการสมดุลประจุระหว่างแหล่งกอกและแหล่งรองรับมลพิษภายใต้สภาวะสมดุล ตามสมการที่ 63 ซึ่งจากหลักการคำนวณค่า critical load ด้วยวิธี FAB model พบว่ามีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณหลายพารามิเตอร์ โดยแต่ละพารามิเตอร์มีวิธีในการประมาณค่าแตกต่างกัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ข้อมูลโดยตรง (direct data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถวัดหรือรวบรวมได้โดยตรง และ 2) ข้อมูลโดยอ้อม (indirect data) เป็นพารามิเตอร์กลุ่มที่ต้องลงพื้นที่เก็บข้อมูล และ พารามิเตอร์กลุ่มที่อาศัยคำนวณจากพารามิเตอร์อื่นๆ จากการประเมินพารามิเตอร์ทั้ง 2 กลุ่ม ค่าของแต่ละพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณค่า critical load ของซัลเฟอร์และไนโตรเจน แสดงดังตาราง 14

จากข้อมูลในตาราง 14 สามารถนำมาคำนวณค่า critical load โดยวิธี FAB model โดยผลการประเมินพบว่า ค่า critical load กรด (ซัลเฟอร์และไนโตรเจน) สำหรับอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี มีค่า เท่ากับ  $6.637 \text{ keq/ha/yr}$  เมื่อพิจารณาค่าที่ประมาณได้ของแต่ละพารามิเตอร์ในตาราง 14 พบว่า แหล่งกำเนิดมลพิษ (การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน) มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความสามารถของแหล่งรองรับ โดยค่าการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนที่ได้จากจุดตรวจวัด กาญจนบุรี(เขื่อนวชิราลงกรณ) มีค่า  $0.122$  และ  $0.085 \text{ keq/ha/yr}$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าการตกสะสมที่ได้จากจุดตรวจวัด กรุงเทพมหานคร ที่ค่า การตกสะสมซัลเฟอร์และไนโตรเจน เฉลี่ยประมาณ  $0.47$  และ  $0.38 \text{ keq/ha/yr}$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากจุดตรวจวัด กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ในเขตเมืองที่มีการจราจรหนาแน่นและใกล้เขตอุตสาหกรรม ซึ่งต่างจาก จุดตรวจวัด กาญจนบุรี(เขื่อนวชิราลงกรณ) ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ชนบทที่พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งค่าการตกสะสมซัลเฟอร์และไนโตรเจนจากจุดตรวจวัด กาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ) จะมีค่าใกล้เคียงกับ จุดตรวจวัดเชียงใหม่ ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าเช่นกัน โดยมีค่าการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจนเฉลี่ยประมาณ  $0.11$  และ  $0.09 \text{ keq/ha/yr}$  ตามลำดับ นอกจากนั้นอาจเป็นเพราะว่าโรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการในจังหวัดกาญจนบุรีส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ได้แก่ โรงงานผลิตน้ำตาล มันเส้น ปุ๋ย และสีข้าว เป็นต้น ดังนั้นแหล่งกำเนิดมลพิษในพื้นที่ศึกษาจึงมีปริมาณไม่มากนักและส่วนใหญ่จะมาจากระบบขนส่งและหรือถูกพัดพามาจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งของมลพิษคือ ไฟป่า เนื่องจากภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าผลัดใบทำให้เกิดปัญหาไฟป่าเกิดขึ้นทุกปี การเกิดไฟป่ามีสาเหตุมาจากทั้งภัยธรรมชาติและการทำงานของมนุษย์ อัตราการ

เกิดไฟป่าในวันยิ่งเพิ่มมากขึ้นทุกปี ซึ่งเกิดจากความต้งการพื้นที่เพาะปลูกของประชาชนทำให้มีการเผาป่าเพื่อทำไร่เลื่อนลอยเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นปัญหาไฟป่าจึงเป็นตัวการสำคัญที่ส่งทำให้มลพิษจากพื้นที่ทางภาคเหนือเกิดการตกสะสมในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าการตกสะสมระหว่างการตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน พบว่า การตกสะสมของไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่าการตกสะสมของซัลเฟอร์

ตาราง 14 ค่าที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณค่า critical load

| พารามิเตอร์                    | ค่าที่ประมาณได้ | lower | upper | SD   | % CV  | หน่วย             |
|--------------------------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------------------|
| Direct data                    |                 |       |       |      |       |                   |
| f                              | 0.78            |       |       |      |       | -                 |
| r                              | 0.08            |       |       |      |       | -                 |
| N <sub>dep</sub>               | 0.09            | 0.03  | 0.16  | 0.04 | 50.80 | keq/ha/yr         |
| S <sub>dep</sub>               | 0.12            | 0.04  | 0.24  | 0.06 | 50.44 | keq/ha/yr         |
| Q                              | 1.15            | 0.49  | 1.59  | 0.30 | 25.93 | m/yr              |
| Indirect data                  |                 |       |       |      |       |                   |
| N <sub>upt</sub>               | 9.98            | 6.28  | 15.30 | 4.72 | 47.28 | keq/ha/yr         |
| N <sub>i</sub>                 | 0.07            |       |       |      |       | keq/ha/yr         |
| N <sub>de</sub>                | -1.00           |       |       |      |       | keq/ha/yr         |
| rS <sub>ret</sub>              | 0.004           |       |       |      |       | keq/ha/yr         |
| rN <sub>ret</sub>              | -1.72           |       |       |      |       | keq/ha/yr         |
| [BC] <sub>t</sub> <sup>*</sup> | 1.09            | 0.92  | 1.19  | 0.07 | 6.63  | eq/m <sup>3</sup> |
| [BC] <sub>0</sub> <sup>*</sup> | 1.25            | 1.05  | 1.37  | 0.09 | 6.99  | eq/m <sup>3</sup> |
| [ANC] <sub>limit</sub>         | 0.02            |       |       |      |       | eq/m <sup>3</sup> |

### การตรวจสอบค่าความอ่อนไหวของค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์

การศึกษาความสามารถในการรองรับกรด (ซัลเฟอร์และไนโตรเจน) ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ์ในครั้งนี้ ถูกจำกัดด้วยความพร้อมของข้อมูลในการนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ ข้อมูลทุติยภูมิในการศึกษานี้รวบรวมจากฐานข้อมูลต่างๆ บางข้อมูลมีการเก็บรวบรวมต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน เช่น การตกสะสมของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ความเข้มข้นของ base cation และ

acid anion ของน้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ, น้ำท่ารายปี ดังนั้นความถูกต้องของค่า critical load จึงเป็นผลมาจากความแม่นยำในการเลือกใช้ข้อมูล และความถูกต้องของข้อมูลหัตถ์ภูมิที่ใช้ ดังนั้นในการศึกษาคั้งนี้จึงได้มีการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูลแต่ละพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบความแปรปรวน ดังแสดงในตาราง 14

การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟต ( $S_s$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ( $S_N$ ) Nitrogen immobilization ( $N_i$ ) และ Acid Neutralization Capacity limit ( $ANC_{limit}$ ) ใน การศึกษานี้เลือกใช้ค่าที่ใช้กันทั่วไปในยุโรป จึงมีความแตกต่างด้านลักษณะภูมิประเทศและภูมิภาค การเลือกใช้ค่าแนะนำหรือค่าที่ใช้กันในยุโรปจึงมีผลต่อความแม่นยำของผลการศึกษาในครั้งนี้ ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่ใช้ในการ คำนวณค่า critical load โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์แต่ละค่าเพื่อทดสอบความ อ่อนไหว โดยแบ่งเป็นสถานการณ์เพื่อทดสอบความอ่อนไหวของแต่ละพารามิเตอร์ ประกอบ ดังนี้ กรณีที่ 1 ใช้  $ANC_{limit}$  เท่ากับ 0  $\mu\text{eq/liter}$  กรณีที่ 2 ใช้  $N_i$  เท่ากับ 214.3  $\text{eq/ha/yr}$  กรณีที่ 3 ใช้  $S_s$  เท่ากับ 0.2 และ 0.8  $\text{m/yr}$  กรณีที่ 4 ใช้  $S_N$  เท่ากับ 2 และ 8  $\text{m/yr}$  และนำมาเปรียบเทียบกับ การ คำนวณกรณีปกติ คือ การคำนวณค่า critical load โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยเลือกค่าที่มีความปลอดภัยและไม่ทำให้ค่า critical load มีค่ามากเกินไปจนความจริง ดังแสดงใน ตาราง 15 จากข้อมูลในตาราง 15 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรท ที่ใช้ในการคำนวณ เป็น 2 และ 8  $\text{m/yr}$  จะทำให้ค่า critical load มี % การเปลี่ยนแปลง 13% และ 10% ตามลำดับ ส่วนการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลให้ค่า critical load มีการ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไนเตรทจึงเป็นพารามิเตอร์ที่อ่อนไหวต่อ การคำนวณค่าความสามารถในการรองรับกรดในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ

ตาราง 15 การตรวจสอบความอ่อนไหวของค่าสัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์

| สถานการณ์                                  | ค่าที่คำนวณได้<br>(keq/ha/yr) | % การเปลี่ยนแปลง |
|--|-------------------------------|------------------|
| CL (กรณีปกติ)                              | 6.637                         | 0                |
| กรณีที่ 1 ตรวจสอบความอ่อนไหว $ANC_{limit}$ |                               |                  |
| CL ( $ANC = 0$ )                           | 6.660                         | 0.347            |
| กรณีที่ 2 ตรวจสอบความอ่อนไหว $N_i$         |                               |                  |
| CL ( $N_i = 214.3$ )                       | 6.768                         | 1.987            |
| กรณีที่ 3 ตรวจสอบความอ่อนไหว $S_N$         |                               |                  |
| CL ( $S_N = 2$ )                           | 7.545                         | 13.686           |
| CL ( $S_N = 8$ )                           | 5.966                         | 10.107           |
| กรณีที่ 4 ตรวจสอบความอ่อนไหว $S_S$         |                               |                  |
| CL ( $S_S = 0.2$ )                         | 6.634                         | 0.035            |
| CL ( $S_S = 0.8$ )                         | 6.639                         | 0.034            |
| ค่าเฉลี่ย                                  |                               | 6.69             |
| SD   |                               | 0.46             |
| %CV  |                               | 6.88             |

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการประเมินความสามารถในการรองรับซัลเฟตและไนโตรเจน (critical load) ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำแควน้อยตอนบนและห้วยปิลอก โดยใช้การศึกษาแบบ steady state method ด้วยวิธี The First-order acidity balance (FAB) model ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยสมการสมดุลประจุระหว่างแหล่งกำเนิดและแหล่งรองรับซัลเฟตและไนโตรเจนในแหล่งน้ำผิวดินและรวมถึงพื้นที่ลุ่มน้ำ ภายใต้สภาวะสมดุล (steady state) โดยระหว่างการศึกษาของซัลเฟตและไนโตรเจนซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บ และแหล่งรองรับซัลเฟตและไนโตรเจนในระบบนิเวศ ประกอบด้วย การกักเก็บซัลเฟตและไนโตรเจนในแหล่งน้ำโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ การดูดซึมไนโตรเจนของพืชเพื่อการเจริญเติบโต การถูกสะเทินด้วย base cation กระบวนการ nitrogen denitrification nitrogen immobilization

จากการประเมินข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณค่า critical load ของกรดด้วยวิธี FAB model ในการศึกษา พบว่า การตกสะสมของไนโตรเจน มีค่า 85.09 eq/ha/yr การตกสะสมของซัลเฟตซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล มีค่า 121.96 eq/ha/yr ไนโตรเจนที่พืชดูดซึมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตมีค่า 9,980 eq/ha/yr Nitrogen Immobilization มีค่า 71.4 eq/ha/yr ไนโตรเจนดีไนตริฟิเคชัน มีค่า -996.76 eq/ha/yr การเก็บกักไนโตรเจนในแหล่งน้ำ มีค่า -1,716.58 eq/ha/yr การเก็บกักซัลเฟตในแหล่งน้ำมีค่า 3.95 eq/ha/yr ความเข้มข้นของ base cation ช่วงก่อนอุตสาหกรรมที่ซึ่งไม่รวมที่ได้รับจากทะเล มีค่า 1.253 eq/m<sup>3</sup> ปริมาณน้ำท่ารายปี มีค่า 1.15 m/yr ดังแสดงในตาราง 16 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อประกอบการคำนวณค่า critical load ของซัลเฟตและไนโตรเจน ด้วยวิธี FAB model โดยผลการศึกษาพบว่า อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณมีความสามารถในการรองรับซัลเฟตและไนโตรเจนได้เท่ากับ 6.637 keq/ha/yr เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้สำหรับการประเมินความสามารถในการรองรับกรด พบว่า ไนโตรเจนที่พืชในพื้นที่รับน้ำดูดซึมไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการรองรับการตกสะสมของกรดได้มากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษาเป็นพื้นที่ป่า

เมื่อพิจารณาค่าการตกสะสมของกรด(ซัลเฟตและไนโตรเจน) ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2558 พบว่า มีค่าการตกสะสมของกรดในช่วง 0.066 – 0.373 keq/ha/yr แสดงให้เห็นว่า อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณยังมีศักยภาพในการรองรับกรดได้มากกว่าการตกสะสมของกรดในปัจจุบัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่พื้นที่โดยรอบอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่า และอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรีเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กจึงมีค่าการตกสะสมของกรดไม่สูง ทำให้อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณยังมีศักยภาพมากพอในการรองรับการตกสะสมของกรดในอนาคต ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่ป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่น้ำแควน้อยตอนบนและลุ่มน้ำห้วยปิลอกมี

อิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการรองรับกรดของแหล่งน้ำผิวดิน ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณที่มีความสำคัญทั้งในแง่การเกษตรและการประมงเกิดความเป็กรต จึงควรมีมาตรการป้องกันปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าที่จะทำให้พื้นที่ป่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ศักยภาพของแหล่งน้ำผิวดินในการรองรับกรดลดลงไปด้วย

ตาราง 16 ค่าที่ได้จากคำนวณของพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการประเมินค่า Critical load

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ประมาณได้ | หน่วย             |
|-------------|-----------------|-------------------|
| $N_{dep}$   | 85.09           | eq/ha/yr          |
| $S_{dep}$   | 121.96          | eq/ha/yr          |
| $N_{upt}$   | 9,980           | eq/ha/yr          |
| $N_i$       | 71.40           | eq/ha/yr          |
| $N_{de}$    | -996.76         | eq/ha/yr          |
| $rS_{ret}$  | 3.95            | eq/ha/yr          |
| $rN_{ret}$  | -1716.58        | eq/ha/yr          |
| $[BC]_0$    | 1.25            | eq/m <sup>3</sup> |
| Q           | 1.15            | m/yr              |

การเปรียบเทียบ critical load การศึกษานี้กับการศึกษาอื่นๆ โดยเมื่อพิจารณาความสามารถในการรองรับกรดของทะเลสาบในแต่ละประเทศ พบว่า ทะเลสาบส่วนใหญ่ในหมู่เกาะ Svalbard มากกว่า 67% มีค่า critical load มากกว่า 1 keq/ha/yr ส่วนทะเลสาบที่อยู่ทางตอนเหนือของสหรัฐอเมริกาและทางตะวันออกของแคนาดา มีทะเลสาบจำนวน 82% มีค่า critical load มากกว่า 0.4 keq/ha/yr และทะเลสาบจำนวน 12.9 % มีค่าการตกสะสมของกรดมากกว่า critical load ส่วนประเทศในภูมิภาคเอเชียที่มีการศึกษาค่า critical load ได้แก่ ประเทศจีน ซึ่งพบว่า แหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่มีค่า critical load ของกรด อยู่ในช่วง 2-15 keq/ha/yr และสำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาค่า critica load ของกรด ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้พบว่า มีค่า critical load ของกรด เท่ากับ 6.637 keq/ha/yr เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรองรับการตกสะสมของกรดของอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณกับแหล่งน้ำผิวดินในประเทศจีน พบว่า อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณมีความสามารถในการรองรับกรดอยู่ในช่วงเดียวกับแหล่งน้ำผิวดินในประเทศจีน ดังแสดงในตาราง 17

ตาราง 17 ค่า critical load ของกรด ในแหล่งน้ำผิวดินประเทศต่างๆ

| ประเทศ  | critical load ของกรด<br>(keq/ha/yr)  | วิธีการ    | อ้างอิง                      |
|---|--|------------|------------------------------|
| Svalbard                                      | - 12% ของแหล่งน้ำผิวดิน<br>มี CL < 0.25<br>- 67 % ของแหล่งน้ำผิวดิน<br>มี CL > 1   | SSWC model | Leif Lien <i>et al.</i> 1995 |
| China   | 2 -15  | FAB model  | Xuemei Ye <i>et al.</i> 2001 |
| Northeastern United States และ Eastern Canada | - 82.8% ของทะเลสาบ<br>มี CL > 0.4<br>- 12.9 % ของทะเลสาบ<br>มีค่าการตกสะสมของกรด<br>มากกว่า CL<br>- 8.6% ของทะเลสาบ<br>มีค่า CL เข้าใกล้<br>exceedance threshold | SSWC model | Dupont J <i>et al.</i> 2005  |
| อ่างเก็บน้ำเขื่อน<br>วชิราลงกรณ<br>ประเทศไทย  | 6.637  | FAB model  | การศึกษานี้                  |

### ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษานี้ใช้ค่าผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิของป่าเบญจพรรณเพื่อประมาณค่าไนโตรเจนที่พืชดูดซึมไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต (Nitrogen uptake) เนื่องจากอายุของป่ามีผลต่อค่าผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิ โดยป่าที่มีอายุน้อยกว่าจะมีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่า เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของผลการศึกษาดังกล่าวจึงควรนำปัจจัยอายุป่ามารวมพัฒนาด้วย

2) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลพื้นที่ป่าในลุ่มน้ำจากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช ซึ่งเป็นข้อมูล ปี พ.ศ.2543 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ค่อนข้างเก่า ในขณะที่ประเทศไทยมีการเก็บข้อมูลพื้นที่ป่าตามเขตการปกครอง ซึ่งในการศึกษานี้ไม่มีข้อมูลมากเพียงพอที่จะนำข้อมูลพื้นที่ป่าแบ่งตามเขตการปกครอง (ปีล่าสุด) มาทำให้เป็นข้อมูลพื้นที่ป่าแบ่งตามพื้นที่ลุ่มน้ำ แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ป่าในประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากจึงคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการคำนวณเพียงเล็กน้อย

3) เนื่องจากประเทศไทยไม่มีข้อมูลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟตและไนเตรท (mass transfer coefficient for sulfate and nitrate) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ข้อมูลหุติยภูมิ ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันทั่วไปในยุโรป ซึ่งอาจทำให้ค่า critical load ที่ได้จากการศึกษานี้มีความคลาดเคลื่อน เพราะประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนดินใต้ท้องน้ำจึงมีมากกว่าในเขตหนาว ดังนั้นจึงควรมีการเก็บข้อมูลปริมาณซัลเฟตและไนเตรทในตะกอนดิน และศึกษาอัตราการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในตะกอนดิน เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซัลเฟตและไนเตรทสำหรับแหล่งน้ำของประเทศไทย





บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2558). *ระบบฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ*. สืบค้นเมื่อ 12 เมษายน 2558, จาก <http://iwis.pcd.go.th/>
- (2558). *สารกรดในบรรยากาศ:มลพิษไร้พรมแดน*. สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน 2558, จาก [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/air\\_aciddeposition.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/air_aciddeposition.html)
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2558). *ข้อมูลโรงไฟฟ้าและเขื่อน*. สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2558, จาก <http://www.egat.co.th>
- (2558). *โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ*. สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2558, จาก <http://www.vrk.egat.com>
- กรมพัฒนาที่ดิน สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. (2547). *คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พีช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ดับบลิว.เจ. พร็อพเพอร์ตี้.
- โกวิทย์ สุวรรณหงส์. (2545). *การศึกษาการตกสะสมของกรดในพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- จินดา แต่มบรรจง. (2548). *เคมีสิ่งแวดล้อม เอกสารประกอบการสอน วิชา คม 479*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- จิรพันธ์ ธีระกุลพิศุทธิ์; และ นันทนา คชเสนี. (2547). *ศักยภาพการสะสมธาตุคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของระบบนิเวศป่าทองผาภูมิ*. รายงานการประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้. หน้า 1-10.
- ดอกรัก มารอด; และ อุทิศ กุฎอินทร์. (2552). *นิเวศวิทยาป่าไม้*. กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์.
- นิตยา เลาะห์จินดา. (2549). *นิเวศวิทยาพื้นฐานสิ่งแวดล้อมศึกษา*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิตาชล ประดับ. (2549). *การศึกษาการตกสะสมของกรดในพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม). นครปฐม: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. ถ่ายเอกสาร.
- ผลิกา รอดประดิษฐ์. (2551). *แนวโน้มการตกสะสมของกรดในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย: การตรวจติดตามและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี). สงขลานครินทร์: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ถ่ายเอกสาร.

- พรพิมล กตทรัพย์. (2550). การประเมินศักยภาพการผลิตและสถานภาพความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำจากการบูรณาการฐานข้อมูลแพลงก์ตอนพืชและพรรณไม้หน้า : กรณีศึกษาในพื้นที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณและอ่างเก็บน้ำเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี. ปรินญา นิพนธ์ วท.ม (วิทยาศาสตร์การประมง). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- พลสุข โปธิรักษ์ิต-ปรัชญานุสรณ์. (2553). เคมีสิ่งแวดล้อมดินน้ำลมไฟ. นครปฐม: สาละ.
- ภาณุมาศ ลาดปลาละ; และสำเร็จ ปานอุทัย. 2549. โครงสร้างและพลวัตของป่าเบญจพรรณ สถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช. กรุงเทพฯ.
- มลิวรรณ บุญเสนอ. (2552). นิเวศพืชวิทยา. นครปฐม:มหาวิทยาลัยศิลปกร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.
- วีรานุช หลาง. (2551). จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรีสม สุวรรณวงศ์. (2547). การวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภิกา วานิชชัง. (2544). การประเมินความสามารถในการรองรับซัลเฟอร์ในอ่างเก็บน้ำภูมิพลโดยใช้ *First order acidity balance model*. ปรินญา นิพนธ์ วท.บ. (นิเวศวิทยาสิ่งแวดล้อม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. (2558). ลุ่มน้ำในประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2558, จาก <http://www.haii.or.th/wiki/index.php/>
- สาพิศ ดิลกสัมพันธ์; และคนอื่นๆ. (2548). วัฏจักรคาร์บอนในป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าเบญจพรรณลุ่มน้ำแม่กลอง. รายงานการประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้. หน้า 77-94.
- สำนักอุทยานแห่งชาติ. (2558). อุทยานแห่งชาติเขาแหลม. สืบค้นเมื่อ 17 เมษายน 2558, จาก <http://park.dnp.go.th/visitor/>
- Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. (2558). *Data Report on the Acid Deposition in the East Asian Region*. สืบค้นเมื่อ 15 เมษายน 2558, จาก <http://www.eanet.asia>
- Aherne J; et al. (2004). Critical loads of acidity for surface waters in south-central Ontario, Canada: Regional applications of the first-order acidity balance (FAB) model. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*. 4: 25–36.
- Arne Henriksen. (1998). *Application of the First-order Acidity Balance (FAB) model to Norwegian surface water*. Report SNO 3809-98, Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway.

- C.E.W. Steinberg; R.F. Wright. (1992). *Acidification of Freshwater Ecosystems Implications for the Future*.
- Christopher Curtis; et al. (2000). *Critical loads of sulphur and nitrogen for freshwaters in Great Britain and assessment of deposition reduction requirements with the The First-order Acidity Balance (FAB) model*. Hydrology & Earth System Sciences. 4(1): 125-140.
- C. Wangead; A. Geater; & R. Tansakul. (1988). *Effects of acid water on survival and growth rate of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus)*. The second international symposium on Tilapia in Aquaculture. P:433-437.
- Dupont J; et al. (2005). *Estimation of Critical loads of acidity for lakes in northeastern United States and eastern Canada*. Environmental Monitoring and Assessment. 109: 275–291
- Encyclopædia Britannica. (2560). *Chemistry of Acid Deposition*. สืบค้นเมื่อ 15 เมษายน 2558, จาก <https://www.britannica.com/science/acid-rain/Chemistry-of-acid-deposition>
- Federal Environmental Agency.(1996). *Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded*.
- Hall J; et al. (1998). *Status of UK critical loads and exceedances. Part 1: Critical loads and critical load maps*. Report prepared under DETR/NERC Contract EPG1/3/116.
- Henning Rodhe; & Rafael Herrera. (1988). *Acidificaton in tropical countries*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Henriksen A; & Dillon PJ. (2001). *Critical load of acidity in south-central Ontario, Canada: I. Application of the Steady-State Water Chemistry (SSWC) model*. Acid Rain Research Report 52/01, Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway.
- Henriksen A; Dillon PJ; & Aherne J. (2002). *Critical loads of acidity for surface waters in south-central Ontario, Canada: Regional applications of the Steady-State Water Chemistry (SSWC) model*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 59: 1287-1295.
- Henriksen A; et al. (1993). *Exceedance of critical loads for lakes in Finland, Norway and Sweden: Reduction requirements for nitrogen and sulfur deposition*. Acid Rain Research Report 32/1993, Norwegian Institute for Water Research, Oslo,Norway.
- Hindar A; et al. (2000). *Development and Application of the FAB model to calculate critical loads of S and N for lakes in Killarney Provincial Park (Ontario, Canada)*. Report SNO 4202-2000, Norwegian Institute for Water Research,Oslo, Norway.

- Holmberg M; et al. (2013). *Relationship between critical load exceedances and empirical impact indicators at Integrated Monitoring sites across Europe*. *Ecological Indicators*. 24: 256–265.
- ICP Modelling & mapping. (2558). *Critical Loads for Aquatic Ecosystems*. สืบค้นเมื่อ 01 เมษายน 2558, จาก [http://www.icpmapping.org/Mapping\\_Manual](http://www.icpmapping.org/Mapping_Manual)
- Johansson M; Tarvainen T. (1997). *Estimation of weathering rates for critical load calculations in Finland*. *Environmental Geology*. 29 (3/4): 158-164.
- Julian A; et al. (2002). *Critical Load of Acidity to Surface Waters in South-central Ontario, Canada II Application of the First-order Acidity Balance (FAB) Model*. Acid Rain Research Report55/02, Norwegian Institute for Water Research, Oslo,Norway.
- Julian A; & Chris J. Curtis. (2003). *Critical loads of acidity for Irish lakes*. *Aquat. Sci.* 65: 21–35.
- L. Rapp; & K. Bishop. (2009). *Surface water acidification and critical loads: exploring the F-factor*. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13: 2191–2201.
- L. Rapp. (2001). *Critical loads of Acid Deposition for Surface Water : Exploring existing models and a potential alternative for Sweden*. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria* 207. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Lei Duana; et al. (2000). *Critical loads of acidity for surface waters in China*. *The Science of the Total Environment*. 246: 1-10.
- Lien L; Henriksen A; & Traaen Tor S. (1995). *Critical loads of acidity to surface waters: Svalbard*. *The Science of the Total Environment*. 160/161: 703-713.
- Lien L; et al. (1996). *A critical limit for acid neutralizing capacity in Norwegian surface waters, based on new analyses of fish and invertebrate responses*. *The Science of the Total Environment*. 177: 173-193.
- Martin Forsius; Juha Klimiri; & Maximilian Posch. (1992). *Critical loads for Finnish lakes: Comparison of three steady-state models*. *Environmental Pollution*. 77: 185-193.
- Posch M; et al. (1997). *Exceedance of Critical Loads for Lakes in Finland, Norway, and Sweden: Reduction Requirements for Acidifying Nitrogen and Sulfur Deposition*. *Environmental Management*. 21(2): 291–304.
- Todd C. McDonnell; et al. (2014). *Steady-state sulfur critical loads and exceedances for protection of aquatic ecosystems in the U.S. southern Appalachian Mountains*. *Journal of Environmental Management*. 146: 407-419.

- Whitfield C.J.; et al. (2006). *A comparison of weathering rates for acid-sensitive catchments in Nova Scotia, Canada and their impact on critical load calculations*. *Geoderma*. 136: 899–911.
- Xuemei Ye; et al. (2002). *Acidification sensitivity and critical loads of acid deposition for surface waters in China*. *The Science of the Total Environment*. 289: 189-203.
- Z. Gagkas; et al. (2010). *Comparison of different critical load approaches for assessing streamwater acid-sensitivity to broadleaf woodland expansion*. *Science of the Total Environment*. 408: 1235–1244





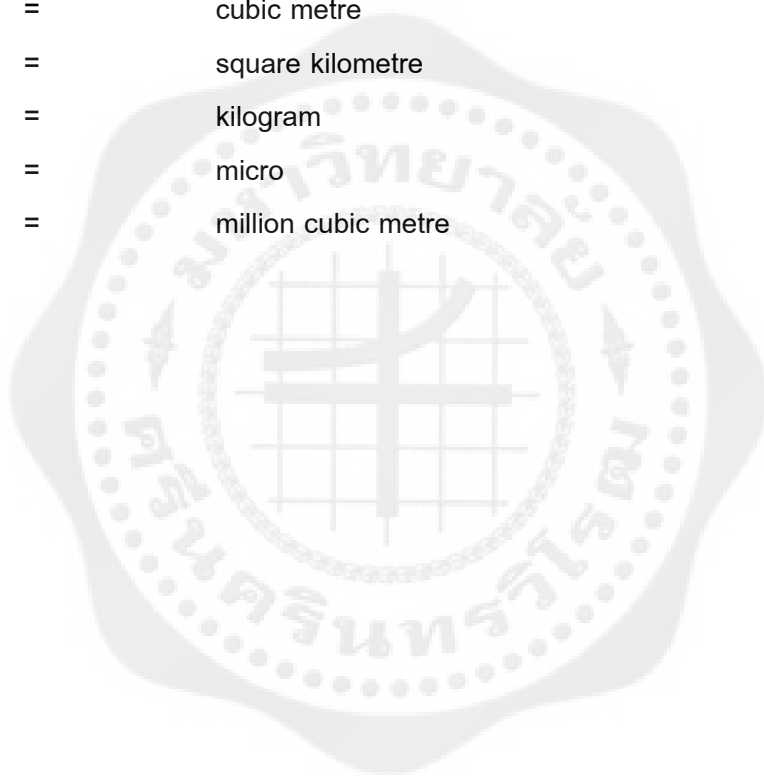
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ประมวลศัพท์และคำย่อ

## ประมวลศัพท์และคำย่อ

|                 |   |                     |
|-----------------|---|---------------------|
| ha              | = | hectare             |
| eq              | = | equivalent          |
| yr              | = | year                |
| m               | = | metre               |
| m <sup>2</sup>  | = | square metre        |
| m <sup>3</sup>  | = | cubic metre         |
| km <sup>2</sup> | = | square kilometre    |
| kg              | = | kilogram            |
| μ               | = | micro               |
| MCM             | = | million cubic metre |





ภาคผนวก ข

สรุปโรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการในจังหวัดกาญจนบุรี

ช่วงปี พ.ศ. 2511 - 2558

ตารางภาคผนวก 1 สรุปโรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการในจังหวัดกาญจนบุรี ช่วงปี พ.ศ. 2511 – 2558

| ปี   | จำพวก 2 |              |       | จำพวก 3 |              |       | รวม   |              |       |
|------|---------|--------------|-------|---------|--------------|-------|-------|--------------|-------|
|      | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน |
| 2511 | 0       | -            | -     | 1       | 0            | 151   | 1     | 0            | 151   |
| 2512 | 2       | 0.44         | 6     | 1       | 0.5          | 7     | 3     | 0.94         | 13    |
| 2513 | 0       | -            | -     | 1       | 14.5         | 10    | 1     | 14.5         | 10    |
| 2514 | 2       | 0.65         | 28    | 1       | 0.13         | 3     | 3     | 0.78         | 31    |
| 2515 | 5       | 0.97         | 33    | 3       | 4.38         | 63    | 8     | 5.35         | 96    |
| 2516 | 0       | -            | -     | 3       | 0.91         | 42    | 3     | 0.91         | 42    |
| 2517 | 2       | 1.1          | 6     | 2       | 3            | 37    | 4     | 4.1          | 43    |
| 2518 | 0       | -            | -     | 7       | 18.44        | 123   | 7     | 18.44        | 123   |
| 2519 | 5       | 1.18         | 26    | 4       | 5.8          | 212   | 9     | 6.98         | 238   |
| 2520 | 5       | 3.08         | 41    | 11      | 4.72         | 57    | 16    | 7.8          | 98    |
| 2521 | 7       | 1.89         | 50    | 13      | 11.76        | 100   | 20    | 13.65        | 150   |
| 2522 | 16      | 5.02         | 82    | 38      | 16.4         | 214   | 54    | 21.42        | 296   |
| 2523 | 14      | 2.41         | 44    | 17      | 17.08        | 70    | 31    | 19.49        | 114   |
| 2524 | 13      | 7.05         | 51    | 18      | 8.4          | 119   | 31    | 15.45        | 170   |

ตารางภาคผนวก 1 (ต่อ)

| ปี   | จำพวก 2 |              |       | จำพวก 3 |              |       | รวม   |              |       |
|------|---------|--------------|-------|---------|--------------|-------|-------|--------------|-------|
|      | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน |
| 2525 | 19      | 6.73         | 97    | 33      | 39.63        | 182   | 52    | 46.35        | 279   |
| 2526 | 5       | 1.73         | 20    | 22      | 27.37        | 179   | 27    | 29.09        | 199   |
| 2527 | 4       | 0.56         | 19    | 18      | 12.47        | 97    | 22    | 13.03        | 116   |
| 2528 | 11      | 3.76         | 55    | 13      | 12.91        | 70    | 24    | 16.67        | 125   |
| 2529 | 12      | 1.67         | 31    | 21      | 23.05        | 240   | 33    | 24.73        | 271   |
| 2530 | 12      | 3.69         | 59    | 14      | 1,557.50     | 853   | 26    | 1,561.19     | 912   |
| 2531 | 15      | 11.94        | 84    | 41      | 63.37        | 1924  | 56    | 75.31        | 2,008 |
| 2532 | 24      | 14.68        | 146   | 14      | 36.33        | 256   | 38    | 51.01        | 402   |
| 2533 | 32      | 15.94        | 156   | 22      | 363.46       | 1702  | 54    | 379.39       | 1,858 |
| 2534 | 47      | 88.67        | 255   | 49      | 48.9         | 283   | 96    | 137.57       | 538   |
| 2535 | 12      | 10.7         | 85    | 8       | 1,952.17     | 550   | 20    | 1,962.87     | 635   |
| 2536 | 27      | 24.54        | 259   | 163     | 3,199.12     | 6231  | 190   | 3,223.65     | 6,490 |
| 2537 | 21      | 33.08        | 236   | 234     | 3,449.65     | 4319  | 255   | 3,482.73     | 4,555 |
| 2538 | 19      | 0.69         | 12    | 175     | 1,555.22     | 3270  | 194   | 1,555.91     | 3,282 |
| 2539 | 19      | 50.38        | 166   | 44      | 1,721.80     | 2166  | 63    | 1,772.17     | 2,332 |

ตารางภาคผนวก 1 (ต่อ)

| ปี   | จำพวก 2 |              |       | จำพวก 3 |              |       | รวม   |              |       |
|------|---------|--------------|-------|---------|--------------|-------|-------|--------------|-------|
|      | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน |
| 2540 | 6       | 17.52        | 35    | 58      | 18,825.79    | 1282  | 64    | 18,843.31    | 1,317 |
| 2541 | 3       | 0.63         | 85    | 37      | 204.61       | 500   | 40    | 205.24       | 585   |
| 2542 | 7       | 12.98        | 75    | 26      | 173.13       | 584   | 33    | 186.1        | 659   |
| 2543 | 13      | 14.78        | 173   | 31      | 411.27       | 494   | 44    | 426.05       | 667   |
| 2544 | 9       | 2.24         | 24    | 34      | 482.42       | 1521  | 43    | 484.66       | 1,545 |
| 2545 | 12      | 23.19        | 93    | 42      | 418.89       | 604   | 54    | 442.08       | 697   |
| 2546 | 12      | 31.49        | 153   | 31      | 772.3        | 1605  | 43    | 803.79       | 1,758 |
| 2547 | 93      | 214.52       | 928   | 78      | 2,532.04     | 2295  | 171   | 2,746.55     | 3,223 |
| 2548 | 6       | 6.86         | 67    | 104     | 2,387.41     | 1866  | 110   | 2,394.27     | 1,933 |
| 2549 | 6       | 3.4          | 48    | 48      | 1,307.48     | 1010  | 54    | 1,310.88     | 1,058 |
| 2550 | 6       | 41.24        | 105   | 32      | 2,356.78     | 783   | 38    | 2,398.02     | 888   |
| 2551 | 7       | 10.52        | 54    | 42      | 334.18       | 772   | 49    | 344.7        | 826   |
| 2552 | 2       | 0.74         | 45    | 53      | 7,892.10     | 2920  | 55    | 7,892.84     | 2,965 |
| 2553 | 1       | 4            | 10    | 64      | 1,980.18     | 1065  | 65    | 1,984.18     | 1,075 |
| 2554 | 2       | 19.89        | 17    | 30      | 1,112.10     | 512   | 32    | 1,132.00     | 529   |

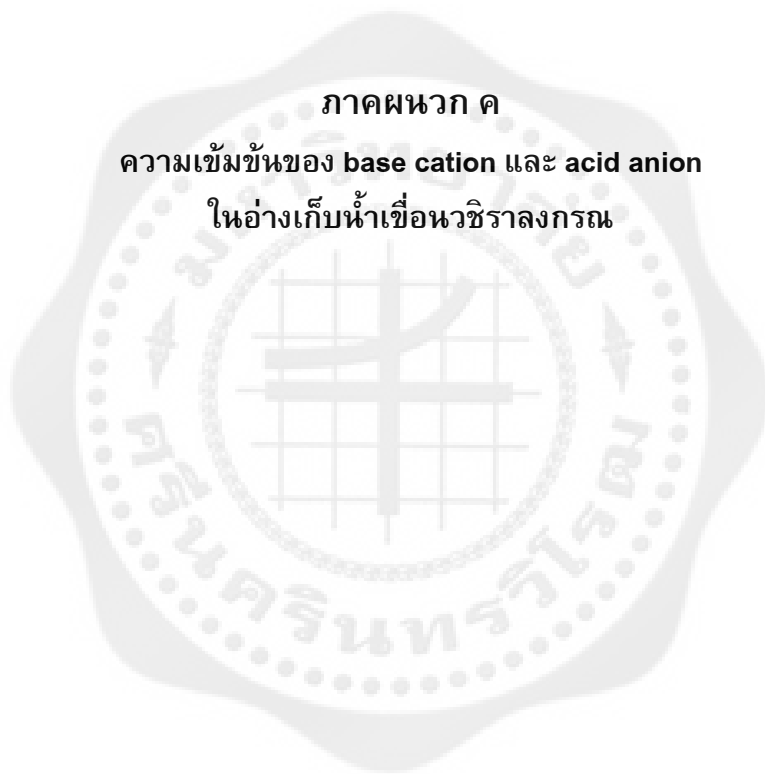
ตารางภาคผนวก 1 (ต่อ)

| ปี   | จำพวก 2 |              |       | จำพวก 3 |              |       | รวม   |              |       |
|------|---------|--------------|-------|---------|--------------|-------|-------|--------------|-------|
|      | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน   | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน | จำนวน | ทุน(ล้านบาท) | คนงาน |
| 2555 | 0       | -            | -     | 45      | 2,411.34     | 765   | 45    | 2,411.34     | 765   |
| 2556 | 9       | 62.05        | 112   | 59      | 3,489.83     | 864   | 68    | 3,551.88     | 976   |
| 2557 | 4       | 8.31         | 26    | 77      | 3,466.26     | 1359  | 81    | 3,474.57     | 1,385 |
| 2558 | 3       | 1.28         | 41    | 60      | 9,136.14     | 1051  | 63    | 9,137.42     | 1,092 |

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม



ภาคผนวก ค  
ความเข้มข้นของ base cation และ acid anion  
ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนห้วยระลอก





ตารางภาคผนวก 2 ความเข้มข้นของ  $\text{Cl}^-$   $\text{NO}_3^-$   $\text{SO}_4^{2-}$   $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ บริเวณจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ บ้านโป่งช้าง(BPP) และ บ้านผาผึ้ง(BPC) ช่วงปี พ.ศ. 2543-2558

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 10/5/2543  | BPP     | -     | 0.169                             | <0.00016                                       | 0.229   | 0.026                            | 1.098                              | 0.165                              | 0.043                             |
| 10/5/2543  | BPC     | -     | 0.169                             | <0.00016                                       | 0.229   | 0.026                            | 0.749                              | 0.247                              | 0.087                             |
| 25/7/2543  | BPP     | -     | 0.198                             | <0.00016                                       | 0.167   | 0.026                            | 1.048                              | 0.576                              | 0.174                             |
| 25/7/2543  | BPC     | -     | 0.141                             | <0.00016                                       | 0.645   | 0.026                            | 1.647                              | 0.576                              | 0.087                             |
| 14/11/2543 | BPP     | 10:00 | 0.051                             | -  | 0.167   | 0.077                            | 0.948                              | 0.247                              | 0.087                             |
| 14/11/2543 | BPC     | 10:30 | 0.051                             | -  | 0.167   | 0.077                            | 0.998                              | 0.329                              | 0.087                             |
| 15/3/2544  | BPP     | -     | 0.141                             | -  | 0.229   | 0.102                            | 0.898                              | 0.329                              | 0.109                             |
| 15/3/2544  | BPC     | -     | 0.169                             | -  | 0.229   | 0.107                            | 0.948                              | 0.329                              | 0.130                             |
| 31/7/2544  | BPP     | -     | 0.117                             | 0.001  | 0.106   | 0.023                            | 0.853                              | 0.226                              | 0.052                             |
| 31/7/2544  | BPC     | -     | 0.115                             | 0.0003   | 0.102   | 0.025                            | 0.793                              | 0.246                              | 0.050                             |
| 20/11/2544 | BPP     | -     | 0.036                             | 0.0003   | 0.026   | 0.025                            | 0.734                              | 0.240                              | 0.032                             |
| 20/11/2544 | BPC     | -     | 0.036                             | 0.0005   | 0.023   | 0.026                            | 0.885                              | 0.314                              | 0.031                             |
| 28/3/2545  | BPP1    | 13.40 | 0.024                             | 0.002  | 0.023   | 0.024                            | 0.778                              | 0.227                              | 0.051                             |
| 28/3/2545  | BPP2    | 13.40 | 0.030                             | 0.001  | 0.024   | 0.023                            | 0.783                              | 0.229                              | 0.060                             |
| 28/3/2545  | BPC1    | 15.30 | 0.021                             | 0.001  | 0.021   | 0.024                            | 0.773                              | 0.250                              | 0.048                             |
| 28/3/2545  | BPC2    | 15.30 | 0.022                             | 0.001  | 0.020   | 0.023                            | 0.783                              | 0.253                              | 0.050                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liler) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liler) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liler) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liler) |
|------------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 17/12/2545 | BPP1    | 11:30 | 0.028               | <0.00016                          | 0.025   | 0.026                            | 0.793                              | 0.252                              | 0.047                             |
| 17/12/2545 | BPP2    | 11:31 | 0.028               | <0.00016                          | 0.025   | 0.027                            | 0.803                              | 0.251                              | 0.048                             |
| 17/12/2545 | BPC1    | 10:30 | 0.029               | <0.00016                          | 0.025   | 0.027                            | 0.768                              | 0.263                              | 0.049                             |
| 17/12/2545 | BPC2    | 10:31 | 0.030               | <0.00016                          | 0.024   | 0.027                            | 0.763                              | 0.263                              | 0.051                             |
| 13/3/2546  | BPP1    | 9:40  | 0.028               | <0.00016                          | 0.039   | 0.027                            | 0.803                              | 0.235                              | 0.056                             |
| 13/3/2546  | BPP2    | 9:40  | 0.027               | <0.00016                          | 0.042   | 0.027                            | 0.803                              | 0.235                              | 0.053                             |
| 13/3/2546  | BPC1    | 13:30 | 0.027               | <0.00016                          | 0.035   | 0.025                            | 0.798                              | 0.277                              | 0.053                             |
| 13/3/2546  | BPC2    | 13:30 | 0.028               | <0.00016                          | 0.038   | 0.026                            | 0.798                              | 0.274                              | 0.055                             |
| 26/6/2546  | BPP1    | 10:00 | 0.019               | <0.00016                          | 0.023   | 0.024                            | 0.788                              | 0.256                              | 0.045                             |
| 26/6/2546  | BPP2    | 10:00 | 0.021               | <0.00016                          | 0.023   | 0.025                            | 0.893                              | 0.263                              | 0.049                             |
| 26/6/2546  | BPC1    | 11:35 | 0.021               | <0.00016                          | 0.023   | 0.024                            | 0.798                              | 0.305                              | 0.050                             |
| 26/6/2546  | BPC2    | 11:35 | 0.019               | <0.00016                          | 0.023   | 0.024                            | 0.803                              | 0.306                              | 0.048                             |
| 4/9/2546   | BPP1    | 10:00 | 0.019               | <0.00016                          | 0.024   | 0.025                            | 0.833                              | 0.226                              | 0.048                             |
| 4/9/2546   | BPP2    | 10:00 | 0.019               | <0.00016                          | 0.024   | 0.025                            | 0.744                              | 0.226                              | 0.049                             |
| 4/9/2546   | BPC1    | 11:00 | 0.019               | <0.00016                          | 0.021   | 0.026                            | 0.749                              | 0.253                              | 0.049                             |
| 4/9/2546   | BPC2    | 11:00 | 0.019               | <0.00016                          | 0.022   | 0.026                            | 0.848                              | 0.254                              | 0.049                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liler) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liler) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liler) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liler) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liler) |
|-----------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 3/12/2546 | BPP1    | 10:00 | 0.028               | <0.00016                          | 0.030   | 0.024                            | 0.810                              | 0.249                              | 0.052                             |
| 3/12/2546 | BPP2    | 10:00 | 0.029               | <0.00016                          | 0.030   | 0.024                            | 0.807                              | 0.248                              | 0.055                             |
| 3/12/2546 | BPC1    | 11:30 | 0.028               | 0.0002                            | 0.023   | 0.024                            | 0.835                              | 0.325                              | 0.043                             |
| 3/12/2546 | BPC2    | 11:30 | 0.029               | 0.0002                            | 0.025   | 0.025                            | 0.853                              | 0.326                              | 0.049                             |
| 11/3/2547 | BPP1    | 10:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.027   | 0.025                            | 0.838                              | 0.240                              | 0.051                             |
| 11/3/2547 | BPP2    | 10:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.028   | 0.025                            | 0.838                              | 0.238                              | 0.050                             |
| 11/3/2547 | BPC1    | 12:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.025   | 0.025                            | 0.808                              | 0.258                              | 0.049                             |
| 11/3/2547 | BPC2    | 12:30 | 0.027               | <0.00323                          | 0.026   | 0.025                            | 0.813                              | 0.258                              | 0.052                             |
| 3/6/2547  | BPP1    | 9:30  | 0.032               | <0.00323                          | 0.032   | 0.035                            | 0.808                              | 0.233                              | 0.062                             |
| 3/6/2547  | BPP2    | 9:30  | 0.026               | <0.00323                          | 0.031   | 0.025                            | 0.813                              | 0.232                              | 0.053                             |
| 3/6/2547  | BPC1    | 11:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.030   | 0.024                            | 0.783                              | 0.257                              | 0.049                             |
| 3/6/2547  | BPC2    | 11:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.029   | 0.023                            | 0.749                              | 0.241                              | 0.051                             |
| 2/9/2547  | BPP1    | 10.30 | 0.026               | <0.00323                          | 0.030   | 0.025                            | 0.719                              | 0.228                              | 0.050                             |
| 2/9/2547  | BPP2    | 10.30 | 0.027               | <0.00323                          | 0.049   | 0.028                            | 0.669                              | 0.221                              | 0.052                             |
| 2/9/2547  | BPC1    | 13.40 | 0.028               | <0.00323                          | 0.029   | 0.027                            | 0.674                              | 0.253                              | 0.050                             |
| 2/9/2547  | BPC2    | 13.40 | 0.023               | <0.00323                          | 0.025   | 0.025                            | 0.719                              | 0.254                              | 0.046                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|-----------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 2/12/2547 | BPP1    | 10:45 | 0.026               | <0.00323                          | 0.028   | 0.025                            | 0.858                              | 0.235                              | 0.048                             |
| 2/12/2547 | BPP2    | 10:45 | 0.028               | <0.00323                          | 0.031   | 0.024                            | 0.848                              | 0.239                              | 0.053                             |
| 2/12/2547 | BPC1    | 14:00 | 0.042               | <0.00323                          | 0.025   | 0.025                            | 0.853                              | 0.315                              | 0.063                             |
| 2/12/2547 | BPC2    | 14:00 | 0.026               | <0.00323                          | 0.022   | 0.025                            | 0.858                              | 0.312                              | 0.050                             |
| 3/3/2548  | BPP1    | 10:30 | 0.068               | 0.0003                            | 0.007   | 0.026                            | 0.744                              | 0.285                              | 0.148                             |
| 3/3/2548  | BPP2    | 10:30 | 0.037               | 0.0002                            | 0.007   | 0.025                            | 0.739                              | 0.266                              | 0.068                             |
| 3/3/2548  | BPC1    | 12:30 | 0.038               | 0.0002                            | 0.030   | 0.024                            | 0.763                              | 0.248                              | 0.062                             |
| 3/3/2548  | BPC2    | 12:30 | 0.041               | 0.0002                            | 0.035   | 0.024                            | 0.749                              | 0.262                              | 0.066                             |
| 9/6/2548  | BPP1    | 10:00 | 0.023               | 0.0002                            | 0.030   | 0.024                            | 0.938                              | 0.254                              | 0.050                             |
| 9/6/2548  | BPP2    | 10:00 | 0.024               | 0.0002                            | 0.028   | 0.025                            | 0.938                              | 0.255                              | 0.051                             |
| 9/6/2548  | BPC1    | 11:45 | 0.025               | 0.0002                            | 0.026   | 0.026                            | 0.888                              | 0.272                              | 0.052                             |
| 9/6/2548  | BPC2    | 11:45 | 0.025               | 0.0002                            | 0.025   | 0.025                            | 0.833                              | 0.272                              | 0.051                             |
| 8/9/2548  | BPP1    | 10:45 | 0.023               | <0.00323                          | 0.034   | 0.026                            | 0.798                              | 0.222                              | 0.054                             |
| 8/9/2548  | BPP2    | 10:45 | 0.027               | <0.00323                          | 0.041   | 0.027                            | 0.798                              | 0.219                              | 0.055                             |
| 8/9/2548  | BPC1    | 12:20 | 0.027               | <0.00323                          | 0.031   | 0.025                            | 0.803                              | 0.240                              | 0.050                             |
| 8/9/2548  | BPC2    | 12:20 | 0.028               | <0.00323                          | 0.034   | 0.027                            | 0.798                              | 0.240                              | 0.056                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 8/3/2549   | BPP1    | 10.0  | 0.027                             | 0.003  | 0.032   | 0.028                            | 0.883                              | 0.201                              | 0.051                             |
| 8/3/2549   | BPP2    | 10.0  | 0.025                             | 0.003  | 0.031   | 0.025                            | 0.868                              | 0.193                              | 0.048                             |
| 8/3/2549   | BPC1    | 11.2  | 0.024                             | 0.003  | 0.027   | 0.021                            | 0.853                              | 0.177                              | 0.043                             |
| 8/3/2549   | BPC2    | 11.2  | 0.024                             | 0.003  | 0.028   | 0.029                            | 0.863                              | 0.263                              | 0.056                             |
| 7/6/2549   | BPP1    | 11:30 | 0.023                             | <0.00323                                       | 0.031   | 0.028                            | 0.848                              | 0.240                              | 0.050                             |
| 7/6/2549   | BPP2    | 11:30 | 0.024                             | <0.00323                                       | 0.030   | 0.028                            | 0.843                              | 0.240                              | 0.051                             |
| 7/6/2549   | BPC1    | 12:30 | 0.024                             | <0.00323                                       | 0.028   | 0.027                            | 0.828                              | 0.267                              | 0.050                             |
| 7/6/2549   | BPC2    | 12:30 | 0.024                             | <0.00323                                       | 0.029   | 0.026                            | 0.818                              | 0.268                              | 0.050                             |
| 6/9/2549   | BPP1    | 10:30 | 0.024                             | <0.00323                                       | 0.032   | 0.026                            | 0.719                              | 0.202                              | 0.047                             |
| 6/9/2549   | BPP2    | 10:30 | 0.025                             | <0.00323                                       | 0.032   | 0.026                            | 0.734                              | 0.206                              | 0.050                             |
| 6/9/2549   | BPC1    | 11:30 | 0.027                             | <0.00323                                       | 0.025   | 0.028                            | 0.744                              | 0.249                              | 0.049                             |
| 6/9/2549   | BPC2    | 11:30 | 0.027                             | <0.00323                                       | 0.028   | 0.028                            | 0.744                              | 0.002                              | 0.049                             |
| 13/12/2549 | BPP1    | 10:30 | 0.019                             | <0.00323                                       | 0.025   | 0.026                            | 0.778                              | 0.228                              | 0.052                             |
| 13/12/2549 | BPP2    | 10:30 | 0.019                             | <0.00323                                       | 0.026   | 0.026                            | 0.788                              | 0.229                              | 0.048                             |
| 13/12/2549 | BPC1    | 12:00 | 0.021                             | <0.00323                                       | 0.026   | 0.025                            | 0.813                              | 0.308                              | 0.051                             |
| 13/12/2549 | BPC2    | 12:00 | 0.019                             | <0.00323                                       | 0.028   | 0.025                            | 0.818                              | 0.306                              | 0.048                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 21/3/2550  | BPP1    | 10:00 | 0.019               | <0.00323                          | 0.028   | 0.026                            | 0.788                              | 0.226                              | 0.051                             |
| 21/3/2550  | BPP2    | 10:00 | 0.019               | <0.00323                          | 0.029   | 0.026                            | 0.783                              | 0.226                              | 0.050                             |
| 21/3/2550  | BPC1    | 11:30 | 0.020               | <0.00323                          | 0.022   | 0.025                            | 0.749                              | 0.252                              | 0.050                             |
| 21/3/2550  | BPC2    | 11:30 | 0.020               | <0.00323                          | 0.023   | 0.025                            | 0.749                              | 0.251                              | 0.050                             |
| 12/7/2550  | BPP1    | 10:25 | 0.020               | <0.00323                          | 0.028   | 0.025                            | 0.818                              | 0.267                              | 0.053                             |
| 12/7/2550  | BPP2    | 10:25 | 0.019               | <0.00323                          | 0.026   | 0.025                            | 0.818                              | 0.267                              | 0.049                             |
| 12/7/2550  | BPC1    | 12:30 | 0.021               | <0.00323                          | 0.029   | 0.025                            | 0.828                              | 0.231                              | 0.055                             |
| 12/7/2550  | BPC2    | 12:30 | 0.033               | <0.00323                          | 0.032   | 0.025                            | 0.853                              | 0.233                              | 0.077                             |
| 17/10/2550 | BPP1    | 10:48 | 0.019               | <0.00323                          | 0.025   | 0.023                            | 0.778                              | 0.242                              | 0.044                             |
| 17/10/2550 | BPP2    | 10:48 | 0.020               | <0.00323                          | 0.027   | 0.023                            | 0.788                              | 0.242                              | 0.043                             |
| 17/10/2550 | BPC1    | 12:45 | 0.020               | <0.00323                          | 0.024   | 0.023                            | 0.778                              | 0.258                              | 0.047                             |
| 17/10/2550 | BPC2    | 12:45 | 0.019               | <0.00323                          | 0.023   | 0.023                            | 0.783                              | 0.258                              | 0.042                             |
| 19/12/2550 | BPP1    | 10:30 | 0.021               | 0.001                             | 0.026   | 0.025                            | 0.953                              | 0.244                              | 0.050                             |
| 19/12/2550 | BPP2    | 10:30 | 0.022               | 0.001                             | 0.028   | 0.026                            | 0.958                              | 0.245                              | 0.052                             |
| 19/12/2550 | BPC1    | 13:30 | 0.019               | 0.001                             | 0.020   | 0.025                            | 0.923                              | 0.333                              | 0.049                             |
| 19/12/2550 | BPC2    | 13:30 | 0.019               | 0.002                             | 0.021   | 0.025                            | 0.923                              | 0.328                              | 0.050                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|-----------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 26/3/2551 | BPP1    | 10:40 | 0.025               | <0.00323                          | 0.033   | 0.027                            | 0.848                              | 0.211                              | 0.054                             |
| 26/3/2551 | BPP2    | 10:40 | 0.025               | <0.00323                          | 0.031   | 0.028                            | 0.848                              | 0.215                              | 0.053                             |
| 26/3/2551 | BPC1    | 12:30 | 0.025               | <0.00323                          | 0.027   | 0.028                            | 0.828                              | 0.249                              | 0.053                             |
| 26/3/2551 | BPC2    | 12:30 | 0.022               | <0.00323                          | 0.026   | 0.028                            | 0.828                              | 0.250                              | 0.052                             |
| 25/6/2551 | BPP1    | 10:30 | 0.022               | 0.0002                            | 0.025   | 0.025                            | 0.793                              | 0.216                              | 0.050                             |
| 25/6/2551 | BPP2    | 10:30 | 0.021               | <0.00016                          | 0.027   | 0.025                            | 0.803                              | 0.216                              | 0.050                             |
| 25/6/2551 | BPC1    | 13:30 | 0.022               | 0.001                             | 0.026   | 0.024                            | 0.788                              | 0.256                              | 0.051                             |
| 25/6/2551 | BPC2    | 13:30 | 0.022               | 0.0002                            | 0.023   | 0.025                            | 0.788                              | 0.256                              | 0.049                             |
| 24/9/2551 | BPP1    | 11:00 | 0.018               | <0.00097                          | 0.024   | 0.024                            | 0.714                              | 0.187                              | 0.051                             |
| 24/9/2551 | BPP2    | 11:00 | 0.019               | <0.00097                          | 0.024   | 0.025                            | 0.719                              | 0.188                              | 0.048                             |
| 24/9/2551 | BPC1    | 13:30 | 0.019               | <0.00097                          | 0.020   | 0.025                            | 0.793                              | 0.263                              | 0.048                             |
| 24/9/2551 | BPC2    | 13:30 | 0.019               | <0.00097                          | 0.021   | 0.025                            | 0.788                              | 0.258                              | 0.051                             |
| 3/12/2551 | BPP1    | 10:00 | 0.021               | 0.001                             | 0.059   | 0.025                            | 0.788                              | 0.204                              | 0.051                             |
| 3/12/2551 | BPP2    | 10:00 | 0.021               | 0.001                             | 0.026   | 0.025                            | 0.734                              | 0.205                              | 0.050                             |
| 3/12/2551 | BPC1    | 11:30 | 0.021               | 0.001                             | 0.020   | 0.023                            | 0.833                              | 0.295                              | 0.049                             |
| 3/12/2551 | BPC2    | 11:30 | 0.021               | 0.001                             | 0.021   | 0.023                            | 0.838                              | 0.297                              | 0.050                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|-----------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 31/3/2552 | BPP1    | 10:30 | 0.019               | 0.001                             | 0.027   | 0.024                            | 0.873                              | 0.243                              | 0.050                             |
| 31/3/2552 | BPP2    | 10:30 | 0.020               | 0.001                             | 0.027   | 0.023                            | 0.873                              | 0.242                              | 0.051                             |
| 31/3/2552 | BPC1    | 12:30 | 0.020               | 0.001                             | 0.023   | 0.025                            | 0.843                              | 0.277                              | 0.051                             |
| 31/3/2552 | BPC2    | 12:30 | 0.020               | 0.001                             | 0.023   | 0.025                            | 0.843                              | 0.273                              | 0.050                             |
| 11/6/2552 | BPP1    | 11:00 | 0.022               | 0.001                             | 0.030   | 0.023                            | 0.808                              | 0.238                              | 0.051                             |
| 11/6/2552 | BPP2    | 11:00 | 0.020               | 0.001                             | 0.040   | 0.023                            | 0.813                              | 0.237                              | 0.051                             |
| 11/6/2552 | BPC1    | 14:30 | 0.021               | 0.001                             | 0.026   | 0.024                            | 0.828                              | 0.286                              | 0.054                             |
| 11/6/2552 | BPC2    | 14:30 | 0.020               | <0.00097                          | 0.044   | 0.024                            | 0.828                              | 0.285                              | 0.051                             |
| 23/9/2552 | BPP1    | 10:30 | 0.018               | 0.001                             | 0.025   | 0.023                            | 0.694                              | 0.212                              | 0.046                             |
| 23/9/2552 | BPP2    | 10:30 | 0.018               | 0.001                             | 0.026   | 0.024                            | 0.699                              | 0.212                              | 0.045                             |
| 23/9/2552 | BPC1    | 12:30 | 0.019               | 0.001                             | 0.038   | 0.025                            | 0.763                              | 0.270                              | 0.047                             |
| 23/9/2552 | BPC2    | 12:30 | 0.020               | 0.001                             | 0.022   | 0.025                            | 0.768                              | 0.270                              | 0.046                             |
| 5/1/2553  | BPP1    | 10:25 | 0.022               | 0.001                             | 0.031   | 0.024                            | 0.788                              | 0.227                              | 0.050                             |
| 5/1/2553  | BPP2    | 10:25 | 0.026               | 0.001                             | 0.030   | 0.024                            | 0.788                              | 0.228                              | 0.052                             |
| 5/1/2553  | BPC1    | 12:00 | 0.025               | 0.001                             | 0.024   | 0.024                            | 0.773                              | 0.285                              | 0.054                             |
| 5/1/2553  | BPC2    | 12:00 | 0.022               | 0.001                             | 0.023   | 0.024                            | 0.773                              | 0.285                              | 0.051                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|-----------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 18/3/2553 | BPP1    | 10:30 | 0.021                             | 0.001  | 0.028   | 0.026                            | 0.803                              | 0.237                              | 0.052                             |
| 18/3/2553 | BPP2    | 10:30 | 0.023                             | 0.001  | 0.029   | 0.027                            | 0.808                              | 0.241                              | 0.055                             |
| 18/3/2553 | BPC1    | 12:30 | 0.030                             | 0.001  | 0.034   | 0.028                            | 0.818                              | 0.299                              | 0.067                             |
| 18/3/2553 | BPC2    | 12:30 | 0.027                             | 0.001  | 0.027   | 0.026                            | 0.803                              | 0.291                              | 0.058                             |
| 23/6/2553 | BPP1    | 10:30 | 0.021                             | 0.002  | 0.028   | 0.025                            | 0.848                              | 0.235                              | 0.047                             |
| 23/6/2553 | BPP2    | 10:30 | 0.021                             | 0.001  | 0.028   | 0.025                            | 0.848                              | 0.235                              | 0.049                             |
| 23/6/2553 | BPC1    | 12:00 | 0.022                             | 0.001  | 0.033   | 0.025                            | 0.848                              | 0.290                              | 0.051                             |
| 23/6/2553 | BPC2    | 12:00 | 0.022                             | 0.001  | 0.033   | 0.026                            | 0.858                              | 0.291                              | 0.050                             |
| 25/8/2553 | BPP1    | 10:50 | 0.028                             | 0.001  | 0.049   | 0.026                            | 0.803                              | 0.230                              | 0.057                             |
| 25/8/2553 | BPP2    | 10:50 | 0.023                             | 0.001  | 0.036   | 0.024                            | 0.808                              | 0.230                              | 0.051                             |
| 25/8/2553 | BPC1    | 11:30 | 0.022                             | 0.002  | 0.032   | 0.025                            | 0.828                              | 0.266                              | 0.048                             |
| 25/8/2553 | BPC2    | 11:30 | 0.021                             | 0.001  | 0.032   | 0.026                            | 0.768                              | 0.263                              | 0.047                             |
| 9/11/2553 | BPP1    | 10:30 | 0.019                             | 0.0003   | 0.045   | 0.026                            | 0.823                              | 0.238                              | 0.050                             |
| 9/11/2553 | BPP2    | 10:30 | 0.019                             | 0.0003   | 0.049   | 0.026                            | 0.828                              | 0.238                              | 0.050                             |
| 9/11/2553 | BPC1    | 13:30 | 0.019                             | 0.001  | 0.098   | 0.027                            | 0.878                              | 0.324                              | 0.049                             |
| 9/11/2553 | BPC2    | 13:30 | 0.019                             | 0.001  | 0.042   | 0.026                            | 0.868                              | 0.323                              | 0.050                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 10/2/2554  | BPP1    | 10:30 | 0.022                             | 0.001  | 0.030   | 0.024                            | 0.858                              | 0.239                              | 0.051                             |
| 10/2/2554  | BPP2    | 10:30 | 0.021                             | 0.001  | 0.031   | 0.024                            | 0.853                              | 0.239                              | 0.050                             |
| 10/2/2554  | BPC1    | 11:30 | 0.020                             | 0.001  | 0.028   | 0.023                            | 0.908                              | 0.309                              | 0.049                             |
| 10/2/2554  | BPC2    | 11:30 | 0.023                             | 0.001  | 0.026   | 0.023                            | 0.898                              | 0.307                              | 0.053                             |
| 24/5/2554  | BPP1    | 10:30 | 0.026                             | 0.001  | 0.035   | 0.023                            | 0.873                              | 0.238                              | 0.055                             |
| 24/5/2554  | BPP2    | 10:30 | 0.026                             | 0.001  | 0.033   | 0.022                            | 0.848                              | 0.233                              | 0.053                             |
| 24/5/2554  | BPC1    | 11:30 | 0.023                             | 0.001  | 0.040   | 0.025                            | 0.963                              | 0.314                              | 0.054                             |
| 24/5/2554  | BPC2    | 11:30 | 0.025                             | 0.002  | 0.036   | 0.025                            | 0.958                              | 0.314                              | 0.057                             |
| 9/8/2554   | BPP1    | 10:30 | 0.021                             | 0.0003   | 0.036   | 0.025                            | 0.823                              | 0.243                              | 0.049                             |
| 9/8/2554   | BPP2    | 10:30 | 0.020                             | <0.00016                                       | 0.033   | 0.024                            | 0.818                              | 0.240                              | 0.053                             |
| 9/8/2554   | BPC1    | 11:30 | 0.026                             | 0.001  | 0.039   | 0.030                            | 0.858                              | 0.292                              | 0.056                             |
| 9/8/2554   | BPC2    | 11:30 | 0.022                             | 0.0002   | 0.029   | 0.027                            | 0.833                              | 0.277                              | 0.050                             |
| 24/11/2554 | BPP1    | 10:30 | 0.022                             | 0.003  | 0.027   | 0.029                            | 0.838                              | 0.246                              | 0.049                             |
| 24/11/2554 | BPP2    | 10:30 | 0.021                             | 0.002  | 0.026   | 0.029                            | 0.843                              | 0.247                              | 0.052                             |
| 24/11/2554 | BPC1    | 15:00 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.021   | 0.030                            | 0.868                              | 0.312                              | 0.053                             |
| 24/11/2554 | BPC2    | 15:00 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.020   | 0.030                            | 0.868                              | 0.310                              | 0.052                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 13/2/2555  | BPP1    | 10:00 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.027   | 0.028                            | 0.858                              | 0.244                              | 0.054                             |
| 13/2/2555  | BPP2    | 10:00 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.028                            | 0.863                              | 0.239                              | 0.052                             |
| 13/2/2555  | BPC1    | 14:00 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.018   | 0.029                            | 0.863                              | 0.298                              | 0.053                             |
| 13/2/2555  | BPC2    | 14:00 | 0.029                             | <0.00016                                       | 0.019   | 0.030                            | 0.858                              | 0.295                              | 0.060                             |
| 17/5/2555  | BPP1    | 13:30 | 0.027                             | <0.00016                                       | 0.028   | 0.029                            | 0.898                              | 0.248                              | 0.053                             |
| 17/5/2555  | BPP2    | 13:30 | 0.027                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.029                            | 0.908                              | 0.249                              | 0.053                             |
| 17/5/2555  | BPC1    | 10:30 | 0.034                             | <0.00016                                       | 0.027   | 0.030                            | 0.958                              | 0.318                              | 0.061                             |
| 17/5/2555  | BPC2    | 10:30 | 0.032                             | <0.00016                                       | 0.026   | 0.029                            | 0.938                              | 0.317                              | 0.059                             |
| 21/8/2555  | BPP1    | 14:00 | 0.025                             | 0.001  | 0.039   | 0.026                            | 0.749                              | 0.208                              | 0.050                             |
| 21/8/2555  | BPP2    | 14:00 | 0.024                             | 0.001  | 0.097   | 0.026                            | 0.749                              | 0.208                              | 0.050                             |
| 21/8/2555  | BPC1    | 10:30 | 0.024                             | 0.005  | 0.037   | 0.027                            | 0.768                              | 0.263                              | 0.046                             |
| 21/8/2555  | BPC2    | 10:30 | 0.025                             | 0.003  | 0.029   | 0.027                            | 0.758                              | 0.260                              | 0.048                             |
| 27/11/2555 | BPP1    | 10:15 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.044   | 0.028                            | 0.729                              | 0.222                              | 0.048                             |
| 27/11/2555 | BPP2    | 10:15 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.028                            | 0.734                              | 0.223                              | 0.049                             |
| 27/11/2555 | BPC1    | 11:20 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.028   | 0.029                            | 0.778                              | 0.287                              | 0.048                             |
| 27/11/2555 | BPC2    | 11:20 | 0.023                             | 0.002  | 0.019   | 0.028                            | 0.778                              | 0.285                              | 0.047                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 6/2/2556   | BPP1    | 10:30 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.024   | 0.027                            | 0.788                              | 0.232                              | 0.048                             |
| 6/2/2556   | BPP2    | 10:30 | 0.027                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.027                            | 0.793                              | 0.230                              | 0.053                             |
| 6/2/2556   | BPC1    | 11:30 | 0.026                             | <0.00016                                       | 0.020   | 0.027                            | 0.808                              | 0.307                              | 0.054                             |
| 6/2/2556   | BPC2    | 11:30 | 0.026                             | <0.00016                                       | 0.021   | 0.027                            | 0.823                              | 0.309                              | 0.054                             |
| 15/5/2556  | BPP1    | 11:00 | 0.019                             | <0.00016                                       | 0.028   | 0.027                            | 0.858                              | 0.242                              | 0.049                             |
| 15/5/2556  | BPP2    | 11:00 | 0.021                             | <0.00016                                       | 0.026   | 0.027                            | 0.863                              | 0.240                              | 0.051                             |
| 15/5/2556  | BPC1    | 13:40 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.028                            | 0.858                              | 0.314                              | 0.053                             |
| 15/5/2556  | BPC2    | 13:40 | 0.023                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.027                            | 0.873                              | 0.315                              | 0.061                             |
| 17/7/2556  | BPP1    | 10:40 | 0.028                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.025                            | 0.858                              | 0.234                              | 0.053                             |
| 17/7/2556  | BPP2    | 10:40 | 0.027                             | <0.00016                                       | 0.024   | 0.025                            | 0.868                              | 0.238                              | 0.049                             |
| 17/7/2556  | BPC1    | 13:00 | 0.029                             | <0.00016                                       | 0.023   | 0.025                            | 0.888                              | 0.335                              | 0.053                             |
| 17/7/2556  | BPC2    | 13:00 | 0.028                             | <0.00016                                       | 0.023   | 0.024                            | 0.903                              | 0.336                              | 0.051                             |
| 14/11/2556 | BPP1    | 11:30 | 0.021                             | <0.00016                                       | 0.030   | 0.024                            | 0.873                              | 0.240                              | 0.047                             |
| 14/11/2556 | BPP2    | 11:30 | 0.021                             | <0.00016                                       | 0.029   | 0.025                            | 0.818                              | 0.239                              | 0.048                             |
| 14/11/2556 | BPC1    | 13:00 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.023   | 0.025                            | 0.808                              | 0.298                              | 0.048                             |
| 14/11/2556 | BPC2    | 13:00 | 0.021                             | <0.00016                                       | 0.023   | 0.024                            | 0.818                              | 0.294                              | 0.045                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่    | Station | เวลา  | [Cl <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|-----------|---------|-------|-----------------------------------|--|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 27/2/2557 | BPP1    | 10:40 | 0.029                             | <0.00016                                       | 0.037   | 0.025                            | 0.833                              | 0.230                              | 0.057                             |
| 27/2/2557 | BPP2    | 10:40 | 0.035                             | <0.00016                                       | 0.036   | 0.028                            | 0.838                              | 0.231                              | 0.065                             |
| 27/2/2557 | BPC1    | 13:00 | 0.031                             | 0.002  | 0.027   | 0.025                            | 0.838                              | 0.291                              | 0.059                             |
| 27/2/2557 | BPC2    | 13:00 | 0.034                             | <0.00016                                       | 0.091   | 0.026                            | 0.848                              | 0.280                              | 0.063                             |
| 27/5/2557 | BPP1    | 11:35 | 0.026                             | 0.0005   | 0.028   | 0.025                            | 0.853                              | 0.222                              | 0.051                             |
| 27/5/2557 | BPP2    | 11:35 | 0.025                             | 0.0005   | 0.026   | 0.026                            | 0.848                              | 0.223                              | 0.049                             |
| 27/5/2557 | BPC1    | 13:45 | 0.022                             | 0.001  | 0.025   | 0.025                            | 0.878                              | 0.270                              | 0.046                             |
| 27/5/2557 | BPC2    | 13:45 | 0.022                             | 0.001  | 0.024   | 0.025                            | 0.873                              | 0.265                              | 0.047                             |
| 30/7/2557 | BPP1    | 10:30 | 0.025                             | 0.002  | 0.029   | 0.025                            | 0.813                              | 0.209                              | 0.053                             |
| 30/7/2557 | BPP2    | 10:30 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.028   | 0.024                            | 0.818                              | 0.210                              | 0.048                             |
| 30/7/2557 | BPC1    | 11:15 | 0.025                             | <0.00016                                       | 0.035   | 0.024                            | 0.843                              | 0.268                              | 0.053                             |
| 30/7/2557 | BPC2    | 11:15 | 0.020                             | <0.00016                                       | 0.025   | 0.023                            | 0.853                              | 0.270                              | 0.045                             |
| 5/11/2557 | BPP1    | 9:40  | 0.020                             | -  | 0.029   | 0.022                            | 0.783                              | 0.228                              | 0.050                             |
| 5/11/2557 | BPP2    | 9:40  | 0.021                             | <0.00016                                       | 0.031   | 0.022                            | 0.793                              | 0.226                              | 0.049                             |
| 5/11/2557 | BPC1    | 10:30 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.024   | 0.023                            | 0.753                              | 0.262                              | 0.052                             |
| 5/11/2557 | BPC2    | 10:30 | 0.022                             | <0.00016                                       | 0.023   | 0.023                            | 0.773                              | 0.263                              | 0.052                             |
| 19/2/2558 | BPP1    | 9:45  | 0.049                             | <0.00016                                       | 0.021   | 0.025                            | 0.818                              | 0.214                              | 0.093                             |

ตารางภาคผนวก 2 (ต่อ)

| วันที่     | Station | เวลา  | [Cl]<br>(meq/liter) | [NO <sub>3</sub> ]<br>(meq/liter) | [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]<br>(meq/liter) | [K <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Ca <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Mg <sup>2+</sup> ]<br>(meq/liter) | [Na <sup>+</sup> ]<br>(meq/liter) |
|------------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 19/2/2558  | BPP2    | 9:45  | 0.025               | <0.00016                          | 0.030   | 0.024                            | 0.818                              | 0.211                              | 0.052                             |
| 19/2/2558  | BPC1    | 10:35 | 0.029               | <0.00016                          | 0.032   | 0.023                            | 0.778                              | 0.235                              | 0.055                             |
| 19/2/2558  | BPC2    | 10:35 | 0.018               | <0.00016                          | 0.019   | 0.023                            | 0.768                              | 0.235                              | 0.053                             |
| 7/5/2558   | BPP1    | 9:50  | 0.028               | <0.00016                          | 0.033   | 0.020                            | 0.778                              | 0.225                              | 0.083                             |
| 7/5/2558   | BPP2    | 9:55  | 0.037               | <0.00016                          | 0.037   | 0.017                            | 0.699                              | 0.203                              | 0.043                             |
| 7/5/2558   | BPC1    | 11:00 | 0.025               | <0.00016                          | 0.048   | 0.017                            | 0.739                              | 0.248                              | 0.036                             |
| 7/5/2558   | BPC2    | 11:55 | 0.040               | <0.00016                          | 0.031   | 0.016                            | 0.709                              | 0.243                              | 0.042                             |
| 9/7/2558   | BPP1    | 9:10  | 0.025               | <0.00016                          | 0.035   | 0.023                            | 0.863                              | 0.227                              | 0.053                             |
| 9/7/2558   | BPP2    | 9:10  | 0.025               | <0.00016                          | 0.032   | 0.023                            | 0.858                              | 0.226                              | 0.052                             |
| 9/7/2558   | BPC1    | 10:30 | 0.023               | <0.00016                          | 0.027   | 0.027                            | 0.823                              | 0.253                              | 0.057                             |
| 9/7/2558   | BPC2    | 10:30 | 0.026               | 0.002                             | 0.029   | 0.024                            | 0.833                              | 0.256                              | 0.053                             |
| 26/11/2558 | BPP1    | 9:55  | 0.021               | <0.00016                          | 0.024   | 0.022                            | 0.838                              | 0.239                              | 0.055                             |
| 26/11/2558 | BPP2    | 10:00 | 0.017               | <0.00016                          | 0.022   | 0.022                            | 0.838                              | 0.249                              | 0.055                             |
| 26/11/2558 | BPC1    | 11:30 | 0.025               | 0.002                             | 0.026   | 0.023                            | 0.848                              | 0.286                              | 0.059                             |
| 26/11/2558 | BPC2    | 11:35 | 0.023               | <0.00016                          | 0.027   | 0.024                            | 0.798                              | 0.286                              | 0.057                             |

ที่มา: โครงการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ



ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล นางสาวจุฑารัตน์ เสี่ยงมวงษ์  
 วันเดือนปีเกิด 26 สิงหาคม พ.ศ. 2531  
 สถานที่เกิด อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ  
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 13/3 หมู่ 5 ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอพระประแดง  
 จังหวัดสมุทรปราการ

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 ระดับมัธยมศึกษาปลาย  
 จากโรงเรียนวัดทรงธรรม จังหวัดสมุทรปราการ  
 พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ  
 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพฯ  
 พ.ศ.2560 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการ  
 ทรัพยากร  
 จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ