

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. บทนำสั้นเรื่อง

ความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การขยายตัวด้านอุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง เป็นสาเหตุสำคัญให้มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบต่างๆ เป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดการปลดปล่อยสารมลพิษในสภาพก๊าซหรืออนุภาคแขวนลอยออกมาสู่บรรยากาศ รวมทั้งสารมลพิษที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดเป็นกรด อย่างไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต ในอุตสาหกรรมที่มีไนโตรเจนและกำมะถันเป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบ หรือเกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่เกิดจากซากพืชและซากสัตว์ที่เรียกว่าฟอสซิล (Fossil fuel) สารมลพิษเหล่านี้สามารถแพร่ออกไปโดยการพา และการฟุ้งกระจายไปกับกระแสลม เกิดการรวมตัวกันเอง จับตัวกับฝุ่นละอองหรือก๊าซและอนุภาคแขวนลอยอื่นๆ หรือจับตัวกับก้อนเมฆเดินทางไปในอากาศได้เป็นร้อยเป็นพันกิโลเมตร เมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำในอากาศ เกิดเป็นกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ก่อให้เกิดปัญหาฝนกรดได้แม้ในดินแดนที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิด จึงเกิดเป็นปัญหามลพิษไร้พรมแดนขึ้น จนกระทั่งตกลงสู่พื้นโลกตามกระบวนการทางธรรมชาติในที่สุด เรียกว่าการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศ (Atmospheric acid deposition) เมื่อตกมายังผิวโลกในลักษณะที่แห้งคืออยู่ในสภาพก๊าซหรืออนุภาคเรียกว่าการตกสะสมกรดแห้ง (Acid dry deposition) เมื่อตกลงมาโดยการปนเปื้อนมากับน้ำฝน หิมะ น้ำค้าง หรือหมอก เรียกว่าการตกสะสมกรดเปียก (Acid wet deposition) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อฝนกรด ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้าน ทั้งต่อทรัพยากรธรรมชาติ สิ่งก่อสร้าง และตัวมนุษย์ ตัวอย่างเช่น ส่งผลต่อความเจริญเติบโตของต้นไม้ ทำให้สภาพป่าไม้ลดลง หรือเกิดผลกระทบต่อด้านเกษตรกรรม เกิดสภาพความเป็นกรดของดินและแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยา เกิดการผุกร่อนของสิ่งก่อสร้าง และเกิดผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ ทำให้ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ถูกทำลายและเกิดปัญหาแก่ปอด เป็นสาเหตุของการเกิดโรคถุงลมปอดอักเสบเรื้อรัง โรคถุงลมโป่งพอง และโรกระบบทางเดินหายใจ ผลกระทบจากปัญหาฝนกรดไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ เป็นไปอย่างช้าๆ จากการสะสมมาเป็นระยะเวลาหลายๆ ปี (Loading effect) ขึ้นอยู่กับความไวของตัวรับหรือแหล่งรับ การตกสะสมของกรดจึงกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมระยะยาวระดับประเทศ ภูมิภาค และโลก

สารกรดในบรรยากาศและการตกสะสมของกรด เป็นปัญหาที่รุนแรงในประเทศอุตสาหกรรมหรือประเทศที่พัฒนาแล้ว ประเทศทางทวีปยุโรปหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ฯลฯ ประสบกับปัญหาฝนกรดมาเป็นระยะเวลาหลายสิบปี ตัวอย่างเช่น เกิดสภาพความเป็นกรดของน้ำในทะเลสาบ ทำให้ปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดความผิดปกติ ตาย และบางชนิดถึงกับสูญพันธุ์ไป เกิดการตายจากยอดจนถึงรากของต้นไม้ในป่า เกิดการผุกร่อนของสิ่งก่อสร้างจากการกัดกร่อนของกรด จนเป็นผลให้เกิดการก่อตั้งหน่วยงานเครือข่ายเคมีด้านบรรยากาศแห่งภาคพื้นยุโรปขึ้น เพื่อศึกษาหาวิธีแก้ไขปัญหาคกรตกสะสมของกรดต่อไป และเช่นเดียวกันกับทางแถบทวีปยุโรป ปัญหาฝนกรดได้มีผลกระทบต่อหลายพื้นที่ของประเทศในแถบทวีปเอเชีย ซึ่งมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาคกรตกสะสมของกรด จึงมีการจัดตั้งเครือข่ายการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia : EANET) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเข้าใจร่วมกันถึงสถานการณ์การตกสะสมของกรด รวมทั้งการนำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในระดับท้องถิ่น ประเทศ และภูมิภาค ประเทศที่เข้าร่วมโครงการ ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ เวียดนาม เกาหลี รัสเซีย มองโกเลีย และประเทศไทย ซึ่งมีกรมควบคุมมลพิษเป็นผู้รับผิดชอบ ปัจจุบันได้มีการจัดตั้งเครือข่ายการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย (Acid Deposition Monitoring Network in Thailand) โดยการร่วมกันของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องและสถาบันการศึกษาในส่วนภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ เพื่อติดตามตรวจสอบสภาวะการตกสะสมของกรด ทั้งที่อยู่ในรูปของการตกสะสมกรดเปียกและการตกสะสมกรดแห้งอย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินสถานการณ์ โอกาส และแนวโน้ม ในการเกิดผลกระทบอันเนื่องมาจากปัญหาการตกสะสมกรด

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่กำลังมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมในอัตราสูง ทำให้ชุมชนเมือง อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่งขยายตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัญหาเรื่องสารกรดในบรรยากาศจึงเริ่มปรากฏขึ้นบ้างแล้ว และอาจทวีความรุนแรงขึ้นในอนาคต เช่นเดียวกับที่เกิดในประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้วดังกล่าวมาเบื้องต้น การศึกษาตรวจสอบการตกสะสมของกรดในส่วนพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย เป็นส่วนหนึ่งของตัวแทนในโครงการดังกล่าว ใช้สถานีเก็บตัวอย่างมหาวิทาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีคุณสมบัติตามหลักเกณฑ์ข้อกำหนดการเลือกพื้นที่จุดเก็บตัวอย่างการตกสะสมกรด คือ เป็นพื้นที่ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากบริเวณชุมชนหนาแน่น ห่างจากแหล่งปล่อยสารมลพิษที่เป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด คือ โรงไฟฟ้าซึ่งใช้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน และการจราจรที่คับคั่ง กำหนดเป็นสถานีเครือข่ายตัวแทนของพื้นที่ใน

**ตามชนบท (Rural site)** ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนกรวดหรือฝุ่นละอองต่าง ๆ ในอากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาสภาพแนวโน้ม ตลอดจนศักยภาพและความสามารถในการรองรับการตกสะสมของกรวด และใช้เพื่อพิจารณามาตรการการกำหนดระดับการปลดปล่อยสารมลพิษที่เป็นตัวการให้เกิดสภาวะฝนกรด เพื่อเป็นแนวทางในการหามาตรการป้องกันหรือแก้ไขก่อนที่จะเกิดปัญหาฝนกรดขึ้น

## 2. การตรวจเอกสาร

### 2.1 ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1.1 ฝนกรดและความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำฝนตามธรรมชาติ

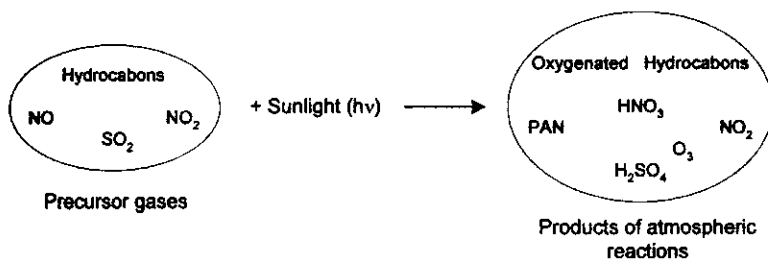
ความเป็นกรดเป็นด่างวัดจากค่าพีเอช (pH) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ion) กรด คือสารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) สารที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนอย่างสมบูรณ์เรียกว่ากรดแก่ สารที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนได้บางส่วนเรียกว่ากรดอ่อน ด่าง คือสารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้หมู่ไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ได้แก่ สารจำพวกออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะ ในการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH มีค่าตั้งแต่ 0-14 ขึ้นอยู่กับสมดุลของกรดและด่าง pH ย่อมาจาก Puissance d' Hydrogen มีค่าเท่ากับ  $-\log [H^+]$  เมื่อ  $[H^+]$  คือค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ดังนั้นเมื่อค่าไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ค่า pH จะลดต่ำลง หมายความว่ามีความเป็นกรดมาก

น้ำบริสุทธิ์มีสมบัติเป็นกลาง มีจำนวนไฮโดรเจนไอออนเท่ากับไฮดรอกซิลไอออน มีค่า pH เท่ากับ 7 น้ำฝนสะอาดตามธรรมชาติไม่ใช่น้ำบริสุทธิ์ จะเป็นกรดอ่อน เนื่องจากในกระบวนการของการเกิดฝน เมื่อไอน้ำระเหยขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศ จะไปผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ซึ่งเป็นกรดอ่อนและไม่มีอันตรายในธรรมชาติ ดังนั้นน้ำฝนตามปกติจะมีค่า pH อยู่ในช่วง 5-7 แต่โดยทั่วไปแล้ว จะมีค่า pH เท่ากับ 5.6 แต่หากในบรรยากาศมีสารต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง อนุภาค หรือก๊าซต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดสารกรด เช่น ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนแล้ว จะสามารถเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นกรดได้ สิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้น้ำฝนมีค่า pH ต่ำกว่าปกติ ก่อให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ฝนกรด เมื่อมีการตกสะสมเป็นระยะเวลาอันยาวนานจะเป็นอันตรายและเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้

#### 2.1.2 แหล่งกำเนิดการตกสะสมกรวดในบรรยากาศ

สารตั้งต้นที่เป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมของกรวด มีทั้งแหล่งที่มาตามธรรมชาติ (Natural sources) เช่น ไฟไหม้ป่า ภูเขาไฟคุหรือระเบิด การระเหยของน้ำทะเล การเนาเย็บของ

แพลงตอน จากพืชซากสัตว์ และสารอินทรีย์อื่นๆ หรือปรากฏการณ์ฟ้าแลบฟ้าผ่า ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับแหล่งที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ (Anthropogenic sources) เช่น การจราจร โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม การเผาขยะมูลฝอย และการใช้เชื้อเพลิงภายในบ้านเรือน เกิดเป็นสารมลพิษปฐมภูมิ (Primary pollutants) เมื่อสารเหล่านี้ถูกปล่อยสู่บรรยากาศโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆ ในบรรยากาศ โดยเฉพาะออกซิเจนและความชื้น เกิดเป็นสารมลพิษทุติยภูมิขึ้น (Secondary pollutants) ที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดกรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นและผลผลิตก๊าซในบรรยากาศ

กระบวนการทางเคมีในบรรยากาศขึ้นอยู่กับจลนพลศาสตร์เคมี ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาชนกันของโมเลกุล 2-3 โมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมี เกิดการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ และเกิดการรวมตัวกับอะตอมอื่นๆ จนเกิดเป็นสารใหม่ขึ้นมา ดังตัวอย่างอย่างง่ายของการรวมตัวกันของก๊าซ 2 โมเลกุล



อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าเท่ากับ  $k[B][C]$  เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา มีค่าขึ้นอยู่กับ Frequency factor ( $A$ ) พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ค่าคงที่ก๊าซในอุดมคติ ( $R$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) ดังสมการ

$$k = A \exp[-E_a / RT] \quad (2)$$

ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซใดๆ ในบรรยากาศ เมื่อ  $E_a > 30 \text{ kJ/mol}$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างต่ำมาก (Stern, 1984) ดังนั้นในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นสารใหม่ จึงอาจมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ตัวอย่างปฏิกิริยาทางเคมีและค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซบางชนิด เป็นดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 พลังงานกระตุ้นและปฏิกิริยาเคมีของก๊าซในบรรยากาศ

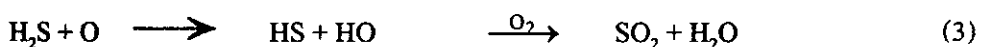
Reaction	$E_a$ (kJ/mol)
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	538
$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$	251
$\text{SO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 + \text{NO}$	106
$\text{O} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{OH} + \text{HS}$	6.3
$\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	< 1
$\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	< 1

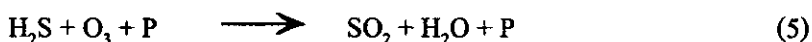
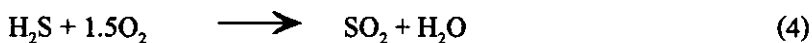
ที่มา : Campbell, 1977

สารมลพิษที่เป็นสารตั้งต้นหลักซึ่งก่อให้เกิดสารกรดในบรรยากาศ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ

### 2.1.2.1 สารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์ ( $\text{SO}_x$ )

สารประกอบซัลเฟอร์ที่พบทั่วไปในบรรยากาศ ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ซึ่งอยู่ในรูปของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (Acid aerosol) แต่ที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดการสะสมกรดคือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีคุณสมบัติเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีคิไฟ ไม่ระเบิด มีกลิ่นแสบจมูก ก่อให้เกิดกรดได้ถ้ามีปริมาณสูง ละลายได้ดีในน้ำและเกิดเป็นกรด โดยทั่วไปพบในบรรยากาศประมาณ 0.02-0.1 ppm เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ คือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจนและไอโซนกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมาจากแหล่งธรรมชาติ คือเกิดจากการเน่าเปื่อยและย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์โดยจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ (Anaerobic bacteria) เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้น มีกลไกการเปลี่ยนแปลงเป็นดังสมการต่อไปนี้ คือ

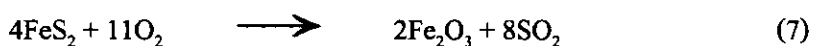




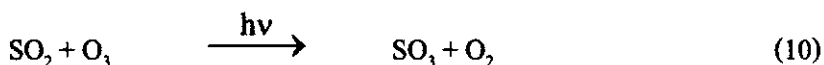
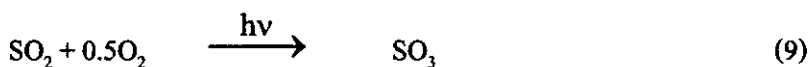
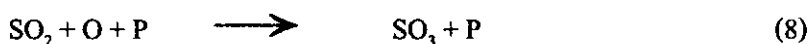
เมื่อ P ในสมการ คือสิ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) อาจเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยในอากาศ เช่น ฝุ่นละออง หรือละอองน้ำ นอกจากนี้แล้วแหล่งกำเนิดธรรมชาติที่สำคัญยังมาจากการระเบิดของภูเขาไฟซึ่งปล่อยผงฝุ่นที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบเข้าสู่บรรยากาศด้วย ในปัจจุบันก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่า > 90 % ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหล่านั้นเกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดมาจากการสันดาปหรือเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือวัสดุที่มีกำมะถัน (S) เป็นส่วนประกอบอยู่ เช่น ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งมีทั้งแหล่งปล่อยอยู่กับที่ (Stationary sources) และแหล่งปล่อยเคลื่อนที่ (Mobile sources) เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ ซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการ



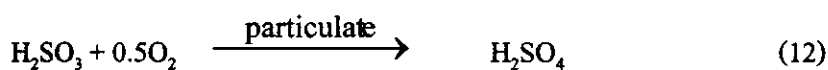
ในกรณีของถ่านหิน กำมะถันส่วนใหญ่ปะปนอยู่ในรูปของสารไพไรต์ (Iron Pyrite) ซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น  $\text{FeS}_2$  เมื่อสารนี้ถูกเผาไหม้ กำมะถันจะถูกออกซิไดซ์ได้  $\text{SO}_2$  ดังสมการ



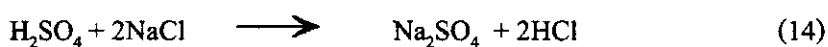
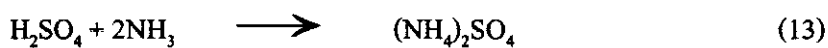
ในกระบวนการเผาไหม้อาจเกิดซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ขึ้นบ้าง แต่มีปริมาณไม่มากนัก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และกรดซัลฟิวริกได้ เมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมงกานีส เหล็ก และวานาเดียม หรือโดยผ่านกระบวนการเคมีแสง (Photochemical process) ซึ่งต้องมีแสงแดดมาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ



ถ้าในบรรยากาศมีความชื้นมากพอ  $\text{SO}_2$  จะรวมกับ  $\text{H}_2\text{O}$  เกิดเป็นกรดซัลฟูรัส ซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์เพื่อเกิดเป็นกรดซัลฟิวริกได้ โดยมีฝุ่นละอองและอนุภาคต่างๆ ในบรรยากาศทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



กรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียหรือเกลือของโลหะ เช่น  $\text{NaCl}$  จากอนุภาคเกลือทะเล (Seasalt particles) เกิดเป็นซัลเฟต ดังนี้



นอกจากนั้นตัวก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เองก็สามารถเกิดเป็นซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว โดยทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียในอากาศที่มีความชื้น ดังสมการ

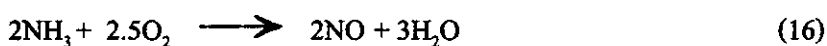


ทั้งนี้แอมโมเนียจะทำหน้าที่เป็นสารบัฟเฟอร์ และตามปกติแล้วซัลเฟอร์จะมีค่าครึ่งชีวิต (Haft life) ประมาณ 3 วัน กล่าวคือ ครึ่งหนึ่งของซัลเฟอร์จะถูกขจัดออกไปจากบรรยากาศในรูปของการตกตะกอนภายใน 3 วัน และโดยทั่วไปแล้ว  $\text{SO}_2$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{SO}_3$  โดย  $\text{O}_2$  หรือ  $\text{O}_3$  จากนั้นจึงเกิดการควบแน่นหรือตกตะกอนในรูปของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  หรือ  $\text{SO}_4^{2-}$  ต่อไป

### 2.1.2.2 สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ )

ไนโตรเจนสามารถรวมกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ได้หลายชนิด เช่น ไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) หรือที่เรียกกันว่าก๊าซหัวเราะ ไนตริกออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) ไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) และไดไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ) แต่สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนที่พบมากในบรรยากาศและเป็นสารมลพิษที่สำคัญอยู่ในรูปของไนตริกออกไซด์ มีลักษณะเป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย และไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งมีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ ก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติ คือเกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าแลบ

ฟ้าผ่า ภูเขาไฟระเบิด และกระบวนการสลายตัวของซากสิ่งมีชีวิตตามวัฏจักรไนโตรเจนเกิดเป็น  $\text{NH}_3$  จากนั้นจึงถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{NO}$  ดังสมการ



หรือเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ซึ่งพบว่า 90 - 95% ของออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ โดยเกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมและยานพาหนะ การเกิดไนตริกออกไซด์มีอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ กล่าวคือ จะเกิดเมื่อมีการสันดาปที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเครื่องยนต์จึงก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนในปริมาณสูง และเนื่องจากในอากาศมีไนโตรเจนปริมาณสูงถึงร้อยละ 78 และมีออกซิเจนอยู่ถึงร้อยละ 21 ดังนั้นไนโตรเจนจะรวมกับออกซิเจนเกิดเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ แสดงดังสมการ



แต่อย่างไรก็ตามก๊าซผสมของไนโตรเจนซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงนี้ จะประกอบด้วยไนตริกออกไซด์เกือบทั้งหมด และเมื่อก๊าซไนตริกออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศจะเกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์และออกซิเจน และในทางกลับกัน แสงแดดจะทำให้ไนโตรเจนไดออกไซด์แตกตัวเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังสมการ



เนื่องจาก  $\text{NO}_2$  ละลายน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นโดยเฉลี่ยแล้ว จะอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 3 วัน เมื่อเกิดการรวมตัวกับละอองน้ำในบรรยากาศหรือน้ำฝน จะเกิดเป็นกรดไนตริก ดังสมการ



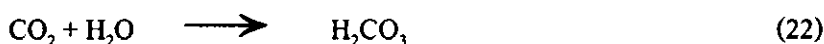
และจะถูกกำจัดออกจากบรรยากาศโดยการตกตะกอนสะสมลงสู่พื้นโลกต่อไป



### 2.1.2.3 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารประกอบ ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน เป็นสารประกอบอินทรีย์ ยกเว้นออกไซด์ของคาร์บอน คาร์ไบด์ และคาร์บอนเนต ที่มีอยู่ใน บรรยากาศส่วนใหญ่แล้วเป็นไฮโดรคาร์บอนระเหยง่าย (Volatile hydrocarbon) เกิดจากก๊าซจากท่อ ไอเสียที่หลงเหลือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์และเกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น อัลเคน อัลคีน อะโรมาติก อัลคิลไฮด์ พาราฟิน และแนฟทีน เป็นต้น

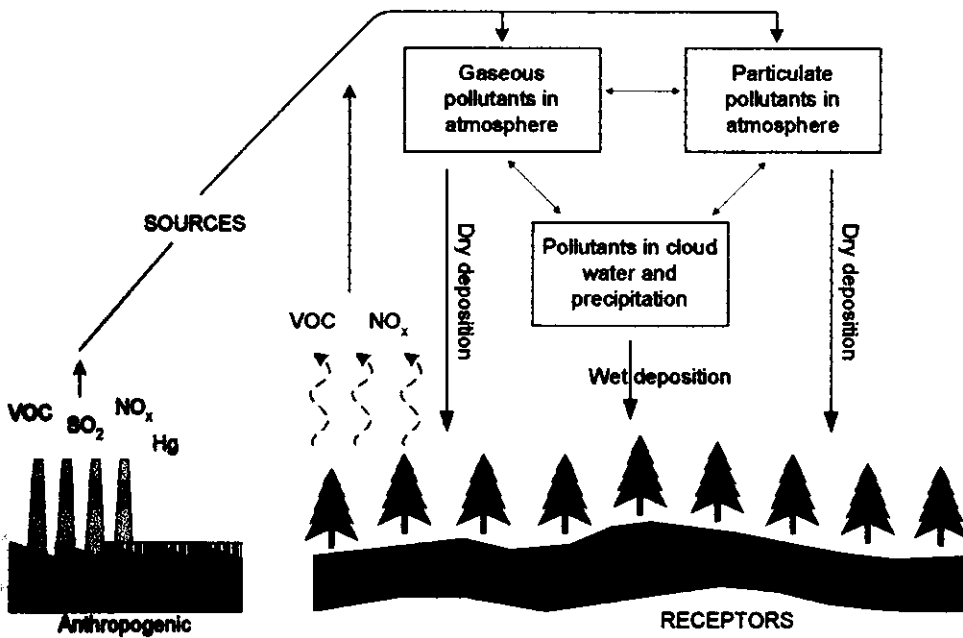
โดยปกติแล้วสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 1 – 4 จะอยู่ใน สถานะก๊าซที่อุณหภูมิปกติ ส่วนพวกสารบริสุทธิ์ที่มีจำนวนคาร์บอน 5 หรือสูงกว่าจะมีสถานะเป็น ของเหลวหรือของแข็ง และส่วนใหญ่แล้วสารประกอบคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 12 จะ ไม่อยู่ในสภาพเป็นก๊าซมากพอที่จะทำให้เกิดปัญหากลายเป็นกรดได้ เมื่อสารประกอบเหล่านี้ใน สถานะก๊าซ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมตัวกับน้ำ จะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งมีสภาพเป็น กรดอ่อน แสดงดังสมการ



ดังนั้นน้ำฝนธรรมชาติจึงมีค่า pH ประมาณ 5.6 ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อมตาม ธรรมชาติ

### 2.1.3 กลไกการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศ

ปฏิกิริยาการเกิดกรดในบรรยากาศและการตกสะสมกรดลงสู่พื้นโลก เกิดขึ้นใน บรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ สารมลพิษที่ก่อให้เกิดกรด คือ สารประกอบ ออกไซด์ของซัลเฟอร์และไนโตรเจน การตกสะสมของกรดเกิดขึ้นเป็นวัฏจักร เริ่มต้นจากสาร มลพิษถูกปล่อยเข้าสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดแบบจุดหรือแบบกระจาย แล้วถูกพาไป ฟู้งกระจาย ไป หรือทำให้เข้มข้นขึ้นในบรรยากาศด้วยเงื่อนไขทางอุณหภูมิมิวิทยา คือสภาวะอากาศ ความเร็วและ ทิศทางลม และลักษณะความสูงต่ำของภูมิประเทศ ดังนั้นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดกรดจึงสามารถ เดินทางไปในบรรยากาศได้เป็นระยะทางหลายร้อยหลายพันกิโลเมตร แล้วจึงสิ้นสุดลงเมื่อเกิดการ ตกสะสมลงสู่พื้นโลก กลไกการตกสะสมของกรดแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กลไกการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศลงสู่พื้นโลก

กระบวนการตกสะสมของกรดจากบรรยากาศ (Atmospheric acid deposition) เกิดขึ้นใน 2 รูปแบบ คือ การตกสะสมกรดเปียก (Acid wet deposition) และการตกสะสมกรดแห้ง (Acid dry deposition) ปริมาณการตกสะสมของกรด พิจารณาในรูปฟลักซ์การตกสะสมของสารกรดที่ลงสู่พื้นที่รองรับ ภายในระยะเวลาที่สังเกตการณ์

### 2.1.3.1 การตกสะสมกรดเปียก

การตกสะสมกรดเปียก คือ กระบวนการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากบรรยากาศลงสู่พื้นโลก โดยรวมมากับน้ำฝน หิมะ น้ำค้าง หมอก หรือน้ำในรูปแบบอื่นๆ แต่เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อน ดังนั้นการตกสะสมกรดเปียกจะตกลงมาในรูปของน้ำฝน หรือที่เรียกกันว่า ฝนกรด ซึ่งเกิดจากการที่กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในบรรยากาศรวมตัวกับก้อนเมฆ แล้วกลั่นตัวเป็นน้ำฝน รวมไปถึงการละลายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ในน้ำฝน และการชะเอาอนุภาคแขวนลอยของสารกรดในบรรยากาศมารวมในน้ำฝน โดยจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารมลพิษเหล่านี้ทั้งสถานะก๊าซ ของเหลว และของแข็ง จากนั้นจึงตกสะสมลงสู่พื้นโลก ค่าปริมาณการตกสะสมของกรดเปียกเป็นดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$F = C \times \frac{V}{A} \quad (23)$$

เมื่อ  $F$  คือฟลักซ์การตกสะสมของสารกรดเปียก ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$ ),  $C$  คือความเข้มข้นของสารกรดเปียกในตัวอย่างน้ำฝน ( $\text{mg}/\text{l}$ ),  $V$  คือปริมาตรของตัวอย่างน้ำฝน ( $\text{l}/\text{yr}$ ) และ  $A$  คือพื้นที่ตกสะสม ( $\text{m}^2$ )

### 2.1.3.2 การตกสะสมกรดแห้ง

การตกสะสมกรดแห้ง คือ การเคลื่อนย้ายของก๊าซและอนุภาคต่างๆ จากบรรยากาศลงสู่พื้นโลก โดยไม่มีการรวมตัวกับหยดน้ำ โดยผ่านกระบวนการพัดพา การแพร่ซึมหรือการตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการตกสะสมของก๊าซและอนุภาคเหล่านี้ ได้แก่ ระดับความปั่นป่วนของบรรยากาศ และลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา แล้วท้ายที่สุดสารมลพิษเหล่านี้จะถูกจับด้วยความสามารถในการดูดซับหรือดูดซึมก๊าซหรืออนุภาคต่างๆ ของพืช ดิน น้ำ และพื้นผิววัสดุอื่นๆ ที่เป็นแหล่งรองรับ ทั้งจากปฏิกิริยาทางเคมีและทางกายภาพ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและสถานะของพื้นผิวยอมรับ

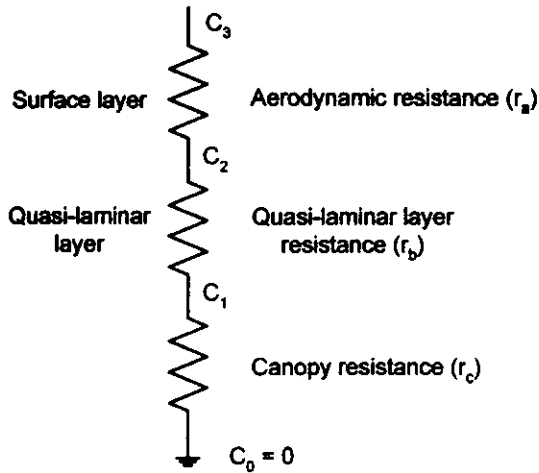
ค่าปริมาณการตกสะสมกรดแห้ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซหรืออนุภาคนั้นๆ ในบรรยากาศ และมีค่าขึ้นอยู่กับความสูงของแหล่งรองรับ มีค่าเป็นคังสมการ

$$F = -v_d C \quad (24)$$

เมื่อ  $F$  คือค่าฟลักซ์การตกสะสมของสารกรดแห้ง ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$ ),  $C$  คือค่าความเข้มข้นของสารกรดแห้งในบรรยากาศ ( $\text{mg}/\text{l}$ ) และ  $v_d$  คือค่าความเร็วการตกสะสมมีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา ซึ่งคำนวณมาจาก Resistance model มีสมการดังนี้คือ

$$\frac{1}{v_d} = r_a + r_b + r_c \quad (25)$$

ค่า  $v_d$  คำนวณได้จากการแบ่งชั้น (Layer) ของการตกลงสู่พื้นดินของสารกรดในบรรยากาศออกเป็น 3 ชั้น คือ Aerodynamic resistance ( $r_a$ ), Quasi-laminar resistance ( $r_b$ ) และ Canopy resistance ( $r_c$ ) โดยที่ ชั้นแรก คือ Surface layer มีการแพร่ผ่านความปั่นป่วนของบรรยากาศ ค่า  $r_a$  คำนวณได้จากลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา คือ อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางลม ปริมาณแสงแดด ความมีเสถียรภาพของบรรยากาศ และความสูงเหนือพื้นดินของพื้นผิวยอมรับ ตามสมการ



ภาพที่ 3 Resistance model

$$r_a = \frac{1}{\kappa u_*} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (26)$$

เมื่อ  $\kappa$  คือ von Karman constant มีค่าเท่ากับ 0.4,  $z$  คือ ความสูงของจุดเก็บตัวอย่าง,  $z_0$  คือ ความสูงของแหล่งรองรับ ส่วน  $u_*$  คือ Friction velocity หาได้จาก

$$\frac{u(x)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{x}{z_0}\right) \quad (27)$$

โดยที่  $u(x)$  คือ ความเร็วลมที่ความสูงของจุดตรวจวัดที่นำมาใช้อ้างอิง

ชั้นที่ 2 คือ Boundary layer มีความหนาในระดับมิลลิเมตร ภายในชั้นนี้อากาศจะอยู่นิ่ง สารต่างๆ จะเคลื่อนที่ผ่านโดยการแพร่ (Diffusion) และการตกจม (Sedimentation) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Quasi-laminar sublayer ค่า  $r_b$  คำนวณได้จากคุณสมบัติการแพร่ของโมเลกุลอนุภาคหรือก๊าซในอากาศ ดังสมการ

$$r_b = \frac{5Sc^{2/3}}{u_*} \quad (28)$$

เมื่อ Sc คือ Schmidt number มีค่าเท่ากับ  $v/D$ ,  $v$  คือ Kinematic viscosity ของอากาศ และ  $D$  คือ Molecular diffusivity ของก๊าซแต่ละชนิด

ขั้นที่ 3 คือความต้านทานที่พื้นผิวของแหล่งรับ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของก๊าซหรืออนุภาค และคุณสมบัติของพื้นผิวแหล่งรับ ค่า  $r_c$  คำนวณได้จากสมการ

$$r_c = \left( \frac{1}{r_{st} + r_m} + \frac{1}{r_{lu}} + \frac{1}{r_{dc} + r_{cl}} + \frac{1}{r_{ac} + r_{gs}} \right)^{-1} \quad (29)$$

โดยที่

$$r_{st} = r_j \left[ 1 + \left( \frac{200}{G + 0.1} \right)^2 \left( \frac{400}{T_s (40 - T_s)} \right) \right] \quad (30)$$

$$r_{st}^i = r_{st} \left( \frac{D_{H_2O}}{D_i} \right) \quad (31)$$

$$r_m^i = \frac{1}{3.3 \times 10^{-4} H_i^* + 100 f_0^i} \quad (32)$$

$$r_{lu}^i = r_{lu} \left( \frac{1}{10^{-5} H_i^* + f_0^i} \right) \quad (33)$$

$$r_{dc} = 100 \left( 1 + \frac{1000}{G + 10} \right) \left( \frac{1}{1 + 1000\theta} \right) \quad (34)$$

$$r_{cl}^i = \left( \frac{10^{-5} H_i^* + f_0^i}{r_{clS} + r_{clO}} \right)^{-1} \quad (35)$$

$$r_{gs}^i = \left( \frac{10^{-5} H_i^* + f_0^i}{r_{gsS} + r_{gsO}} \right)^{-1} \quad (36)$$

เมื่อ  $r_{st}$  คือ Leaf stomatal resistance,  $r_m$  คือ Mesophyll resistance,  $r_{lu}$  คือ Leaf cuticular resistance,  $r_{dc}$  คือ Resistance by buoyant convection,  $r_{cl}$  คือ Resistance to uptake by exposed surface,  $r_{ac}$  คือ Transfer resistance (at ground),  $r_{gs}$  คือ Resistance to uptake by soil,  $G$  คือค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation),  $T_s$  คืออุณหภูมิของอากาศ,  $D_{H_2O}/D_i$  คือค่า Molecular diffusivity ของน้ำต่อก๊าซใดๆ,  $H_i^*$  คือ Effective Henry's law constant และ  $f_0^i$  คือ Normalized reactivity factor สำหรับก๊าซที่ละลายในน้ำได้ มีค่าอยู่ในช่วง 0-1

## 2.1.4 ผลกระทบจากการตกสะสมของกรด

เมื่อมีการตกสะสมของกรดลงมาสู่แหล่งน้ำหรือผิวดิน จะทำให้น้ำและดินมีสภาพความเป็นกรดมากขึ้น จึงเกิดความเสียหายต่อพืช สัตว์ มนุษย์ และระบบนิเวศวิทยา รวมทั้งก่อให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้คือ (Horwood, 1995)

### 2.1.4.1 ผลกระทบต่อป่าไม้และธาตุอาหารพืช

ฝนกรดเป็นพิษต่อพืชโดยตรง พืชที่ไวต่อฝนกรด จะเกิดอาการไหม้เป็นแผล และตายไป ส่งผลให้ป่าไม้ถูกทำลาย ปฏิกิริยาของฝนกรดซึ่งทำความเสียหายให้กับพืชในพื้นที่ป่าแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ คือ

ระยะแรก เม็ดฝนอาจทำความเสียหายโดยตรงต่อพืชจากความเป็นกรดในน้ำฝน แต่ถ้าความเป็นกรดของน้ำฝนมีค่าไม่มากนัก ต้นไม้จะได้รับผลประโยชน์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนในดิน ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในระยะต้นจึงอาจพบผลกระทบในแง่บวก เช่น การสังเคราะห์แสงของต้นสน Red spruce (*Picea rubens*) จะเพิ่มขึ้น 35% เมื่อได้รับฝนกรด pH 3.0 เมื่อเปรียบเทียบกับฝนกรด pH 4.5

ระยะที่สอง เมื่อเริ่มมีการสะสมของกรดในดิน จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนไอออนและไอออนบวกซึ่งเป็นบัพเฟอร์ที่ดินดูดซับไว้ ทำให้เกิดการชะละลายไอออนบวกเหล่านี้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหาร เช่น แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg) และโปแตสเซียม (K) ซึ่งการสูญเสีย Ca และ Mg จะส่งผลต่อเซลล์ในคอร์เท็กซ์ มีผลต่อการส่งลำเลียงน้ำ ทำให้มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของไม้ยืนต้น นอกจากนี้ฝนกรดยังส่งผลต่อการลดลงของธาตุฟอสฟอรัส (P) และไนโตรเจน (N) ของต้นไม้อีกด้วย

ระยะที่สาม เป็นช่วงที่ดินสูญเสียสภาพบัพเฟอร์ ซึ่งตามปกติแล้วในดินจะมีอลูมิเนียมและธาตุโลหะหนักอยู่ แต่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลาย เมื่อมีการตกสะสมของกรดเกิดขึ้น กรดจากกำมะถันจะทำให้อลูมิเนียมและธาตุโลหะหนักในดินละลาย ก่อให้เกิดอันตรายต่อรากฝอยของพืช ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำและการเจริญเติบโตของพืชลดลง นอกจากนี้ยังทำให้พืชอ่อนแอ เกิดการถูกทำลายจากโรคราและแมลงได้มากขึ้น

ระยะที่สี่ เรียกอีกชื่อว่า ระยะ Succession stage ผลกระทบจากปัจจัยบางอย่างอาจทำให้ต้นไม้ในระยะนี้ถึงกับตายได้ ตัวอย่างเช่น การตายของต้นไม้ในปีที่ร้อนแล้ง การขึ้นต้นตายจากบนลงล่าง (Dieback) ของต้นไม้ในป่าหลายแห่งในทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ การลดลงของความต้านทานต่อความหนาวเย็นของพืชในเขตอบอุ่นและเขตหนาว และการปิดของปากใบเนื่องจาก SO<sub>2</sub> ในอากาศ ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง ใบเหลือง และร่วงหล่น

#### 2.1.4.2 ผลกระทบต่อดิน

ดินที่ได้รับฝนกรดมีการลดลงของค่า pH ไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ดินจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ เนื้อดิน (Soil texture), ค่าการอิ่มตัวของด่าง (Base saturation), ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC), องค์ประกอบของอินทรียสาร (Organic matter content), ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน (Mobility), ความแข็งของดิน, ลักษณะผิวหน้าของดิน และปริมาณน้ำฝนในพื้นที่นั้นๆ ในระยะแรกของการได้รับผลกระทบ พบว่าฝนกรดจะเพิ่มการชะล้างในดิน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของซัลเฟตเข้ามาแทนที่ ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียและราในดินลดลง เมื่อเวลาผ่านไปการชะล้างในดินจะเกิดเพิ่มขึ้น จึงอาจทำให้เกิดการสูญเสียสารที่เป็นค่าไปจากดินได้นอกจากนั้นยังเกิดผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในดิน คือ ฝนกรดจะมีผลต่อกระบวนการ Ammonification ทำให้เกิดการลดลงของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นสารบัพเฟอร์ ทำให้ความเป็นกรดในดินเพิ่มสูงขึ้น และยังพบว่า ที่ pH 3.6 และ 4.7 จะไม่พบกิจกรรมของ Free living bacteria ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการ Nitrogen fixation จึงแสดงให้เห็นว่า ฝนกรดทำให้กระบวนการ Nitrogen mineralization ลดลง

#### 2.1.4.3 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำ

ผลกระทบต่อแหล่งน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างหรือ Acid neutralizing capacity (ANC) ของน้ำในแหล่งน้ำนั้น ซึ่งพบว่าน้ำที่มีแคลเซียมน้อยกว่า 2.5 mg/l จัดว่าเป็นแหล่งน้ำที่มีความไวต่อกรด และยังขึ้นกับระยะเวลาที่ผิวหน้าของน้ำสัมผัสกับฝนกรดที่ตกลงมาด้วยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากฝนกรดมีหลายอย่าง เช่น ทำให้ค่า pH ของน้ำลดลง ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น สัตว์น้ำขนาดเล็กที่อาศัยอยู่ตามท้องน้ำ (Benthic invertebrates) ลดลง มีการเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ และบางชนิดถึงกับตายไป นอกจากนั้นโลหะหนัก เช่น อลูมิเนียม นิกเกิล และทองแดง ซึ่งปกติพบได้ตามซอกหินและแร่ในดิน และไม่ละลายน้ำ เกิดการละลายเนื่องจากฝนกรด เรียกว่า เกิดการเคลื่อนย้าย (Mobilization) และลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ แล้วยังก่อให้เกิดการผิปกติในการพัฒนาตัวอ่อนของสัตว์น้ำในระยะเอมบริโออีกด้วย

#### 2.1.4.4 ผลกระทบต่อวัสดุหรือสิ่งก่อสร้าง

สารประกอบซัลเฟตจะกัดกร่อนวัสดุและสิ่งก่อสร้างต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น หินปูน หินอ่อน หินชนวน กระเบื้องหลังคา และปูนซีเมนต์ โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยากับละอองซัลเฟตจะกลายเป็นแคลเซียมซัลเฟต ทำให้เกิดการสึกกร่อนขึ้น นอกจากนั้นสารประกอบซัลเฟตยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะ ซึ่งการกัดกร่อนนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ

อย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของปรอทโลหะและวัสดุ และระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าการลดลงของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศจาก 0.15 ppm เป็น 0.05 ppm จะสามารถลดอัตราการกักกร่อนของสังกะสีลงได้ถึง 4 เท่า แต่ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าร้อยละ 70 อัตราการกักกร่อนจะเพิ่มสูงขึ้น

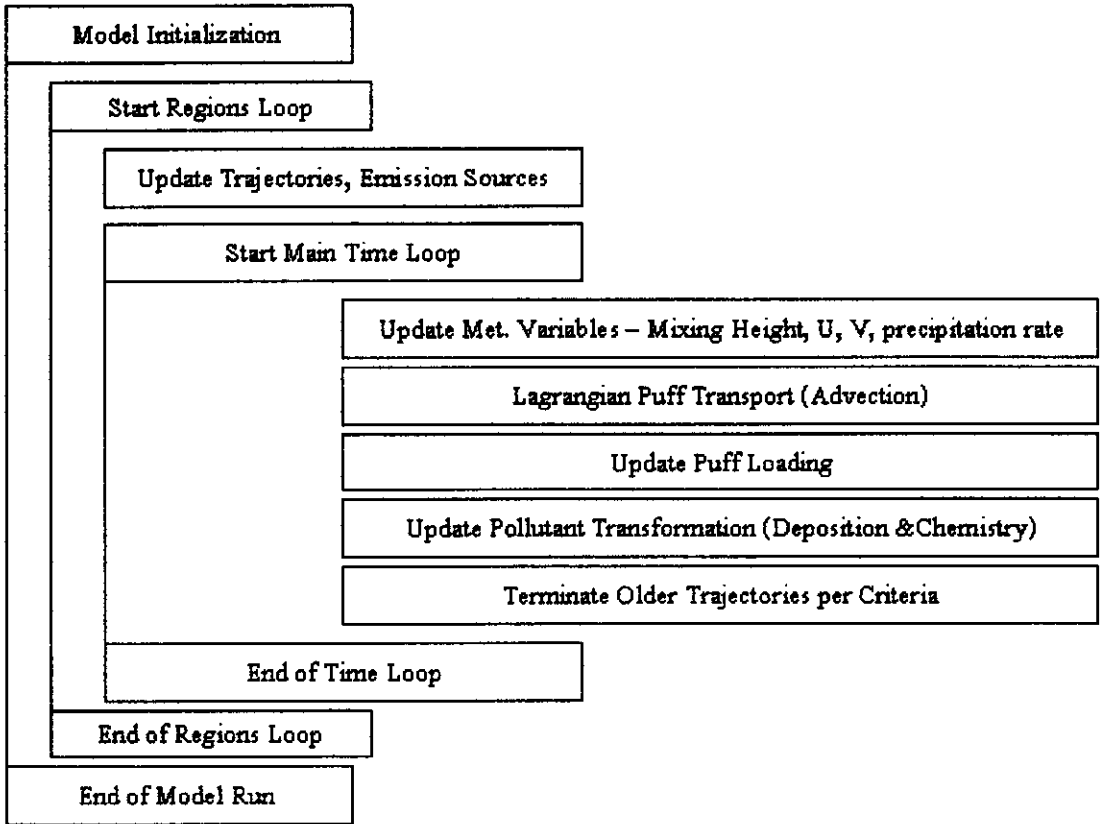
#### 2.1.4.5 ผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์

การตกสะสมของกรดส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ ผลกระทบโดยตรง คือ การรับสารกรดเข้าสู่ร่างกายโดยกระบวนการหายใจ ถ้าได้รับในปริมาณไม่มากนัก จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อจมูก คอ และระบบทางเดินหายใจส่วนบน แต่เมื่อได้รับในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้เกิดอาการไอเรื้อรัง ทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจหรือทำอันตรายต่อปอดได้นอกจากนั้นยังเกิดผลกระทบทางอ้อม คือ เมื่อน้ำฝนกรดหรือกรดน้ำ เช่น ปลา และพืชผลที่มีการสะสมของสารพิษจากโลหะหนัก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพความเป็นกรดของแหล่งน้ำและดิน จะเป็นสาเหตุให้เกิดโรคและปัญหาต่อสุขภาพได้

#### 2.1.5 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ATMOS2 ประเมินค่าปริมาณการตกสะสมกรด

ATMOS/UrBAT (Regional and Urban Branch Atmospheric Trajectory Model; ซอฟต์แวร์ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Center for Global and Regional Environmental Research, The University of Iowa, 1995) เป็นแบบจำลองสำหรับทำนายความเข้มข้นสารมลพิษในบรรยากาศและปริมาณการตกสะสมของสารมลพิษลงสู่พื้นโลก พัฒนามาจากแบบจำลอง BAT (Branch Atmospheric Trajectory; ซอฟต์แวร์ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย The USA National Oceanic Atmospheric Administration, 1983) และ RAINS-Asia (The Regional Air Pollution Information System for Asia; ซอฟต์แวร์ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย The International Institute of Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: IIASA) เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้ตรวจสอบการตกสะสมของกรดในภูมิภาคเอเชียมากยิ่งขึ้น ตัวโปรแกรมเป็นภาษา Fortran ใช้งานบน Linux สามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://www.cgrrer.uiowa.edu/ATMOS/atmos-urbat-linux>



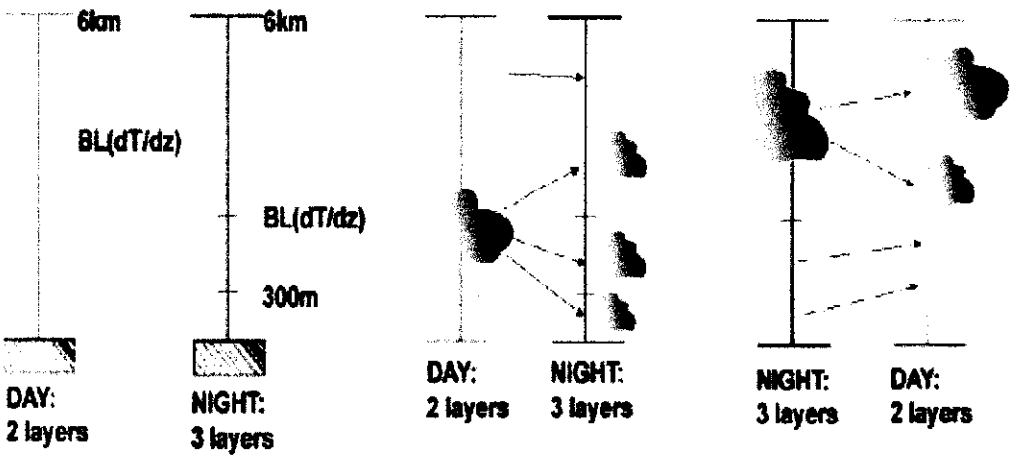


ภาพที่ 4 โค้ดแกรมแสดงรูปแบบการทำงานของแบบจำลอง ATMO2

ATMO2 เป็นเวอร์ชัน 2 ของ ATMO/UrBAT เป็นแบบจำลองชนิด Multi-layers forward trajectory lagrangian puff-transport model ใช้งานบน Unix/Linux โดยกำหนดให้สารมลพิษ (ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์) เปรียบเสมือนมวลสารเป็นก้อน (Puff) ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดทุกๆ 3 ชั่วโมง เคลื่อนที่ไปในอากาศตามเงื่อนไขทางอุณหพลศาสตร์ แล้วทำการติดตามการเคลื่อนที่ของก้อนมวลสารไปจนกว่าจะตกลงสู่พื้นดิน ซึ่งก็คือภายในระยะเวลา 120 ชั่วโมง หรือความเข้มข้นมวลสารเหลืออยู่ 0.1% ของตอนเริ่มต้น แบ่งระดับชั้นบรรยากาศเป็น 2 ชั้น ในเวลากลางวัน คือ Boundary/Upper layer และ 3 ชั้น ในเวลากลางคืน Surface/Boundary/Upper layer ดังแสดงในภาพที่ 5 กำหนดความสูงสูงสุดของก้อนมวลสารในแบบจำลองเท่ากับ 6,000 เมตร โดยที่ในชั้นบรรยากาศเดียวกันมวลสารจะผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันในแนวตั้ง ลักษณะการกระจายตัวของก้อนมวลสารในชั้นบรรยากาศต่างๆ ในเวลากลางวันและกลางคืน เป็นดังแสดงในภาพที่ 6

<b>Day</b>	<b>Night</b>	<b>6000m</b>
<b>Upper</b>	<b>Upper</b>	
<b>Critical Inversion Layer</b>		
<b>Boundary</b>	<b>Boundary</b>	
	<b>Surface</b>	<b>300m</b>

ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างของระดับชั้นบรรยากาศที่เกิดการแพร่กระจายของซัลเฟอร์



ภาพที่ 6 กลไกการกระจายตัวของก้อนมลสารในชั้นบรรยากาศต่างๆ

การเคลื่อนที่ของก้อนมลสาร แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี ในที่นี้คือการเปลี่ยนจาก  $SO_2$  กลายเป็น  $SO_4^{2-}$  และการตกตะกอนสะสม ซึ่งเกิดได้ 2 แบบ คือ การตกสะสมแห้ง (Dry deposition) อัตราการตกสะสมขึ้นอยู่กับความเร็วการตกสะสมและความสูงตำแหน่งก้อนมลสาร มีค่าคงสมการ

$$R_d = \frac{v_d}{z} \tag{37}$$

และการตกสะสมเปียก (Wet deposition) ซึ่งอัตราการตกสะสมขึ้นอยู่กับ Precipitation scavenging coefficient และปริมาณน้ำฝน มีค่าดังสมการ

$$R_w = S_p \times p \quad (38)$$

ค่าอัตราการตกสะสมของกรดเปียกและกรดแห้งซึ่งใช้สำหรับแบบจำลอง ATMOS2 มีค่าดังแสดงในตาราง 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ  $\text{SO}_2$  เป็น  $\text{SO}_4^{2-}$  เป็นดังแสดงในตาราง 4 (ที่มา : CGRER, The University of Iowa, Dec, 2001 )

ตาราง 2 ค่าอัตราการตกสะสมของกรดเปียกสำหรับแบบจำลอง ATMOS2

Variable Name	(Scavenging Rate, per sec) (precipitation rate, mm/hr)
$\text{SO}_2$	$(2.0 \times 10^{-5}) \times \text{precipitation rate}$
$\text{SO}_4$	$(5.0 \times 10^{-5}) \times (\text{precipitation rate})^{0.83}$
$\text{PM}_{10}$	$(7.0 \times 10^{-5}) \times \text{precipitation rate}$
$\text{PM}_{2.5}$	$(6.0 \times 10^{-5}) \times (\text{precipitation rate})^{0.83}$

ตาราง 3 ค่าอัตราการตกสะสมของกรดแห้งสำหรับแบบจำลอง ATMOS2

Variable Name	Deposition rate (m/sec)
$\text{SO}_2$ (over land)	$2.5 \times 10^{-3}$ : months between May and September (hot season) $1.25 \times 10^{-3}$ : the rest of the year (cold season)
$\text{SO}_2$ (over water bodies)	$3.2 \times 10^{-3}$
$\text{SO}_4$ (over land)	$2.0 \times 10^{-3}$
$\text{SO}_4$ (over water bodies)	$1.0 \times 10^{-3}$
$\text{PM}_{10}$ (over land)	$7.0 \times 10^{-3}$
$\text{PM}_{10}$ (over water bodies)	$7.0 \times 10^{-3}$
$\text{PM}_{2.5}$ (over land)	$2.0 \times 10^{-3}$
$\text{PM}_{2.5}$ (over water bodies)	$1.0 \times 10^{-3}$

ตาราง 4 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ SO<sub>2</sub> เป็น SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Variable Name	Conversion rate (per sec)
f_lat	$\text{Cos}(1.3 \times \text{lat} \times \pi/180)$
f_day	$\text{Sin}((\text{Julian day} - 80) \times 2\pi/365)$
rate	$(1 \times 10^{-5}) \times f_{\text{lat}} + (4 \times 10^{-6}) \times (1-f_{\text{lat}}) \times f_{\text{day}}$

ข้อมูลการปลดปล่อยสารมลพิษ (Emission) กำหนดตามตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิด บวกพิกัดเป็นละติจูด (latitude) และลองจิจูด (longitude) เป็นข้อมูลจากงานวิจัยของ D.G. Streets และคณะ (2003) ซึ่งดาวน์โหลดได้จาก [www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION\\_DATA/index\\_16.htm](http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA/index_16.htm) แบ่งประเภทของแหล่งกำเนิดออกเป็น 3 ชนิด คือ Area sources ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เตาเผา หม้อไอน้ำ และขบวนการพาหนะ ถูกปลดปล่อยสู่ Boundary/Surface layer, Large point sources ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะถูกปลดปล่อยสู่ Upper/Boundary layer และ Volcanic sources จะถูกปลดปล่อยสู่ Upper layer ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ชนิดของแหล่งกำเนิดซัลเฟอร์และระดับชั้นบรรยากาศที่สารมลพิษสะสมอยู่

Emission Source Type	Layer of Emission	
	Daytime	Nighttime
Large Point Source	Upper Layer	Boundary Layer
Area Source	Boundary Layer	Surface Layer
Volcano	Upper Layer	Upper Layer

ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยสำหรับแบบจำลองนี้ เป็นข้อมูลจาก NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับแบบจำลองทางค่านบรรยากาศโดย Dr. Giuseppe Calori จากข้อมูลงานวิจัยของ Ms. Narisara Thongbooncho จาก The University of Iowa โดยข้อมูลนี้จะบอกเป็นข้อมูลราย 6 ชั่วโมง ที่ตำแหน่งกริด  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  ประกอบด้วยข้อมูล 3 ประเภท คือ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ข้อมูล

ความเร็วและทิศทางลม และข้อมูล Mixing height สำหรับข้อมูลของทวีปเอเชียดาวโหลดมาได้ จาก <http://www.cgrer.uiowa.edu/ATMOS/metdata>

ผลที่ได้จากแบบจำลอง คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยทุก 3 ชั่วโมง ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และซัลเฟตในบรรยากาศ และค่าปริมาณการตกสะสมของกรดเนื่องจากซัลเฟอร์ ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ในช่วงเวลาต่างๆ ที่ตำแหน่งกริด  $1^\circ \times 1^\circ$  ดังนั้นเมื่อทราบตำแหน่งพิกัดของพื้นที่ศึกษา (latitude & longitude) จึงสามารถทราบค่าความเข้มข้นและปริมาณการตกสะสมของสารกรดได้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 งานวิจัยต่างประเทศ

Whelpdale et al., 1997 ทำการติดตามตรวจสอบค่าการตกสะสมของกรดทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ในพื้นที่ในส่วนต่างๆ ทั่วโลก พบว่า ค่าปริมาณการตกสะสมกรดเปียกของ  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  เป็นดังแสดงในตาราง 6 ซัลเฟตที่ตรวจพบส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มพื้นที่ที่ประกอบอุตสาหกรรมหนักในทวีปยุโรป แอมโมเนียมพบมากในกลุ่มประเทศทางแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และแคลเซียมจะพบมากในประเทศที่มีปริมาณฝุ่นมาก เช่น ประเทศจีน ส่วนค่าปริมาณการตกสะสมของกรดแห้งของซัลเฟตและไนเตรต แสดงดังตาราง 7 และ 8 ตามลำดับ โดยในการพิจารณาค่าปริมาณการตกสะสม จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วการตกสะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาสภาพอากาศ และลักษณะภูมิประเทศของแต่ละประเทศ

ตาราง 6 ค่าอัตราส่วนเชิงโมล  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  ของการตกสะสมกรดเปียก

Location	$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (mol/mol)
Europe	
Western Europe	1.0-1.2
Eastern Europe	< 1.0
Northern Europe	< 1.0
North America	
Average	~ 1.0
Northeast, winter and snow	~ 2.0
Former Soviet Union	
Eastern, range and median	0.6 – 0.9, 0.7

ตาราง 6 (ต่อ)

Location	$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (mol/mol)
Northern and central, range and median	0.1 – 0.3, 0.4
South-central, range and median	0.6 – 1.4, 0.8
Middle East	
Israel	~ 0.1
Arabian, largest cities	~ 1.7
Southeast Asia	
Japan, range and median	0.5 – 1.3, 0.8
Japan, large cities	> 1.0
Korean	~ 0.6
China	
Northern, average	0.4
South, average	0.2
Background, average	0.1
Hongkong, range and median	0.2 – 1.0, 0.4
India, median	~ 0.4
Austria	~ 1.5
New Zealand	~ 0.2
South America	
Brazil, median	0.7
Venezuela, median	2
Other	0.8
Africa	
Arid savannah	~ 1
Humid savannah and rain forest	~ 2
Polar Regions	
Greenland	~ 1
Arctic	~ 0.5
Antarctic	~ 1
Oceans	~ 1

ที่มา : Whelpdale et al., 1997

ตาราง 7 ค่าการตกสะสมกรดแห้งของซัลเฟต และร้อยละของการตกสะสม

Sources	Dry deposition (mmol/m <sup>2</sup> .yr)	Dry/Total deposition (%)
North America (non urban location)	-	30-50
Canada	-	20-40
Europe	-	60-70
Germany (population and industrial area)	50	> 60
Southern Norway	5	20
Japan	3-45	10-50
Korean	3-45	30
China		
Residual area	250	70-80
Rural or Mountain sites	50	45
Hongkong	47	40-75
India (cities)	95	2/3 of total
Malaysia (urban/industrial location)	20	30
Soviet Union (Kola Peninsula)	> 9	50
Australia (Few industrial & population location)	> 15	70-85
South America (Savannah & Amazon forest)	> 1	< 15
Africa		
Arid savannah	1	35
Humid savannah	1	20
Rain forest	1	< 10
Marian Regions	0.06-0.25	50

ที่มา : Whelpdale, 1997

Matsuda et al.,1999 ได้ศึกษาการตกสะสมของกรดแบบแห้ง โดยเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Denuder และ Filter pack แล้วทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, Sulfate และ Nitrate ทั้งจากก๊าซและ Aerosols ในช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม ปี 1998 และประเมินค่าปริมาณการตกสะสมกรดจากค่าความเร็วการตกสะสม (Deposition velocity, v<sub>d</sub>) สำหรับพื้นผิวแต่ละชนิดซึ่งเป็นจุดเก็บตัวอย่างในประเทศญี่ปุ่น โดยมีพื้นที่ดังต่อไปนี้คือ ป่าสน ป่าไม้ผลัดใบ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นผิวน้ำ โดยกำหนดค่าความสูงของพื้นผิวเหล่านี้เท่ากับ 1, 1, 0.1, 0.0001 เมตร

ตามลำดับ ค่าความเร็วการตกสะสมขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานในการตกลงสู่พื้นทีรองรับ  $r_s$ ,  $r_b$  และ  $r_c$  โดยที่  $r_s$  ขึ้นอยู่กับสภาพการคงตัวของอากาศ  $r_b$  และ  $r_c$  ขึ้นอยู่กับฤดูกาลซึ่งมีผลต่อพื้นผิวยรับ ซึ่งเป็นต้นไม้ จากการศึกษาพบว่าค่า  $v_d$  สำหรับป่าสน ป่าไม้ผลัดใบ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นผิวน้ำ สำหรับ Aerosols แบบละเอียด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคน้อยกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  มีค่าเท่ากับ 0.45, 0.45, 0.16 และ 0.03 cm/s ตามลำดับ และ ค่า  $v_d$  สำหรับ Aerosols แบบหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคมากกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  มีค่าเท่ากับ 1.2, 1.2, 0.71 และ 0.22 cm/s ตามลำดับ จึงสรุปว่าค่า  $v_d$  จะมีค่ามากขึ้นเมื่อความสูงของต้นไม้หรือพื้นผิวยรับมีค่าสูง และมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

ตาราง 8 ค่าการตกสะสมกรดแห้งของไนเตรดและร้อยละของการตกสะสม

Sources	Dry deposition (mmol/m <sup>2</sup> .yr)	Dry/Total deposition (%)
North America (non urban location)	-	30-50
Canada	-	20-40
Europe	-	20-50
Germany	30	40
Southern Norway	5	< 20
Hongkong	95	80-90
India (urban)	95	50-90
Malaysia (industrial location)	25	40
Australia	8	55-65
South America	1	< 15
Marian Regions	1	20

ที่มา : Whelpdale, 1997

Xu et al.,1999 พัฒนาแบบจำลองการตกสะสมของกรดเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เส้นทาง การตกสะสมของซัลเฟตในทวีปเอเชีย โดยกำหนดตัวแทนช่วงเวลา 4 ฤดู คือ เดือนกุมภาพันธ์ เดือนเมษายน เดือนสิงหาคม และเดือนตุลาคม ผลการเปรียบเทียบการวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟรไดออกไซด์ อนุภาคซัลเฟต และไอออนของซัลเฟตที่ตกสะสมแบบเปียก พบว่าการตกสะสมแบบเปียกเกิดขึ้นมากกว่าการตกสะสมแบบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนและฤดู



ใบไม้ผลิ การตกสะสมแบบเปียกของซัลเฟตจะเกิดมากกว่าในช่วงเดือนที่อากาศแห้ง อย่างเช่น เดือนตุลาคม โดยที่อัตราส่วนทั้งหมดของการตกสะสมแบบเปียกต่อการตกสะสมแบบแห้ง สำหรับเดือนกุมภาพันธ์เท่ากับ 1.6 เดือนเมษายนเท่ากับ 1.2 เดือนกันยายนเท่ากับ 2.9 และเดือนตุลาคมเท่ากับ 1.9

Lee et al.,2000 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำฝนเป็นรายวัน ที่ 9 สถานี ในเกาหลีใต้ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 1996 ถึงเดือนเมษายน 1998 แล้วทำการวิเคราะห์ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และความเข้มข้นของไอออนต่างๆ คือ  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และ  $\text{K}^+$  พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของ  $\text{NO}_3^-$  และ non-seasalt  $\text{SO}_4^{2-}$  เท่ากับ 19.3 และ 43.0  $\mu\text{eq/l}$  ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับทางตะวันออกเฉียงเหนือของอเมริกา และทางตอนกลางของยุโรป พบว่า ระดับของ  $\text{H}^+$  ที่ได้ส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าต่ำกว่า เป็นผลเนื่องจากปริมาณของแอมโมเนียและแคลเซียมที่ทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของน้ำฝน

Fujita et al.,2000 ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของน้ำฝน ภายได้ความร่วมมือกันระหว่างสถานีตรวจวัดต่างๆ ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ระหว่างปี 1992-1993 พบว่า ปริมาณการสะสมแบบเปียกของไอออนที่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ปริมาณการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดไอออนต่างๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ และเงื่อนไขทางอุตุนิยมวิทยา เช่น ทิศทางลมและรูปแบบของฝน จากการศึกษาพบว่า น้ำฝนในบริเวณพื้นที่แถบตะวันออกเฉียงเหนือของจีน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหลักของไอออนเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ มีค่า pH สูง (ความเป็นกรดต่ำ) ในขณะที่น้ำฝนในบริเวณเกาะทางตอนเหนือของแปซิฟิก ซึ่งอยู่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดไอออนซึ่งเกิดเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ กลับมีค่า pH ต่ำ (ความเป็นกรดสูง)

Park et al.,2000 พัฒนาแบบจำลอง Seoul เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การตกสะสมแบบเปียกของซัลเฟต ซึ่งใช้ร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลการตรวจสอบคุณภาพอากาศ โดยการแบ่งชนิดของเมฆฝนตามความแตกต่างกันออกเป็น 4 ชนิด คือ Cold cloud , Warm cloud , Stratified layered cloud และ Convective cloud จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำฝนของเมฆชนิดต่างๆ ซึ่งมีความแตกต่างกับความเข้มข้นของซัลเฟตในอากาศ โดยทำการวิเคราะห์จาก Routinely available monitored data และ Regression equation โดยที่การวิเคราะห์ความเข้มข้นของซัลเฟตในอากาศจะใช้ Regression equation 2 ชนิด คือ สำหรับใช้ในฤดูหนาว

และสำหรับใช้ในฤดูอื่นๆ และเมื่อนำแบบจำลองนี้มาใช้วิเคราะห์การตกสะสมแบบเปียกของ ซัลเฟตในปี 1997 พบว่า ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตอยู่ในช่วงระหว่าง 3450-3770 kg/km<sup>2</sup>.yr ในขณะที่ค่าได้จากการวัดเท่ากับ 3510 kg/km<sup>2</sup>.yr

Gimeno et al., 2001 ศึกษาถึงผลจากการลดการปลดปล่อย SO<sub>2</sub> ในยุโรปและทาง ตะวันออกของสหรัฐอเมริกา โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า Acidifying Potential (AP) ของการตกสะสมแบบเปียก ซึ่งนิยามเท่ากับ [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] - ([Ca<sup>2+</sup>] + [Mg<sup>2+</sup>]) พบว่าการลดลงของ SO<sub>2</sub> ในอากาศไม่มีผลต่อแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเป็นกรด เนื่องจากถึงแม้ว่าปริมาณซัลเฟตจะ ลดลง แต่มีการลดลงของ Ca<sup>2+</sup> ในน้ำฝน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์เกิดขึ้นด้วย

Network Center for EANET, 2001 ศึกษาสภาพความเป็นกรดและองค์ประกอบทางเคมี ของน้ำฝน ในปี 2000 ใน 10 ประเทศ ซึ่งเป็นสมาชิกในโครงการ EANET โดยเก็บตัวอย่างน้ำฝน ด้วยอุปกรณ์ Automatic wet sampler collector และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ด้วย วิธี Ion chromatography ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้ คือ

ตาราง 9 ผลการศึกษาการตกสะสมกรดเปียกในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ค่าเฉลี่ยของปี 2000

Country	Char.	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> μmol/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> μmol/l	Cl <sup>-</sup> μmol/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> μmol/l	Na <sup>+</sup> μmol/l	K <sup>+</sup> μmol/l	Ca <sup>2+</sup> μmol/l	Mg <sup>2+</sup> μmol/l
China										
- Guanyinqiao	Urban	4.33	152.0	42.1	24.0	161.0	11.8	14.2	63.0	8.5
- Nanshan	Rural	4.22	130.0	41.6	15.6	105.0	7.7	16.3	55.2	7.0
Indonesia										
- Jakarta	Urban	5.18	58.7	17.6	21.5	77.3	52.4	-	87.6	219.3
- Kototabang	Remote	4.51	3.7	6.2	6.8	1.1	-	-	4.0	-
Japan										
- Tappi	Remote	4.72	21.9	12.9	178.0	9.6	149.0	3.6	6.4	17.5
- Banryu	Urban	4.64	15.6	13.9	31.0	11.6	28.9	1.4	4.2	3.3
- Ijira	Rural	4.52	19.9	24.1	23.0	23.8	19.9	2.9	6.8	2.9

ตาราง 9 (ต่อ)

Country	Char.	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> μmol/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> μmol/l	Cl <sup>-</sup> μmol/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> μmol/l	Na <sup>+</sup> μmol/l	K <sup>+</sup> μmol/l	Ca <sup>2+</sup> μmol/l	Mg <sup>2+</sup> μmol/l
Malaysia										
- Petaling Jaya	Urban	4.35	23.5	27.2	8.5	43.7	5.0	1.8	6.8	1.4
- Tanah Rata	Remote	4.79	4.1	3.3	6.8	41.1	1.9	1.1	2.3	0.4
Mongolia										
- Ulaanbaatar	Urban	6.26	24.3	19.9	9.0	52.0	7.9	3.9	37.7	4.1
- Terelj	Remote	5.52	16.4	17.6	9.0	44.3	6.5	4.5	15.2	3.2
Philippines										
- Metro Manila	Urban	5.48	23.4	12.1	25.6	35.5	30.6	15.5	14.5	6.3
- Los Banos	Rural	5.44	10.5	5.4	33.0	13.6	34.8	1.7	7.0	3.7
Korea										
- Kanghwa	Rural	5.00	31.6	42.4	54.9	37.6	56.3	5.6	26.5	9.3
- Cheju	Remote	4.85	23.2	15.3	210.0	20.2	152.0	6.3	13.8	18.6
Russia										
- Irkutsk	Urban	5.11	30.1	21.0	11.6	32.1	8.8	4.4	28.0	5.0
- Listvyanka	Rural	5.07	15.4	18.7	5.0	16.5	4.6	4.7	12.8	2.9
Thailand										
- Bangkok	Urban	4.95	21.6	21.6	12.6	41.3	6.9	3.2	11.4	2.0
- Patumthani	Rural	5.25	19.6	18.6	10.4	38.3	10.9	2.3	13.2	2.4
Vietnam										
- Hanoi	Urban	5.45	30.1	16.1	24.3	27.5	18.1	4.1	20.9	5.0
- Hoa Binh	Rural	5.11	16.3	9.7	20.3	8.0	12.7	3.6	13.1	4.7

ที่มา : Network Center for EANET, 2001

Streets et al.,2003 ได้ศึกษาค่าปริมาณการปลดปล่อยสารมลพิษทางอากาศในทวีปเอเชีย ในปี 2000 เพื่อพัฒนามาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่กระจายสารในบรรยากาศ และการวิเคราะห์ TRACE-P โดยการร่วมมือกันระหว่างองค์การ NASA (National Aeronautics and Space Administration) กลุ่ม ACE-Asia ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ NSF (National Science Foundation) และ NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) โดยประเมินค่าการปลดปล่อย

สารมลพิษจากแหล่งใหญ่ๆ ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมทั้ง Biomass burning ใน 64 ประเทศของทวีปเอเชีย ได้ดังต่อไปนี้ คือ มีปริมาณการปลดปล่อยสาร  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , NMVOC, Black carbon (BC), Organic carbon (OC) และ  $\text{NH}_3$  มีค่าเท่ากับ 34.3, 26.8, 9870, 279, 107, 52.2, 2.54, 10.4 และ 27.5 Tg ตามลำดับ โดยที่ NMVOC ยังแบ่งออกได้อีก 19 กลุ่มย่อย ตามชนิดที่มาของการทำปฏิกิริยา จึงสามารถแยกแยะแหล่งที่มาหลักและชนิดของก๊าซหรืออนุภาคที่เป็นสารมลพิษได้มาจากบริเวณใด ตามการวิเคราะห์ TRACE-P และ วิธีการวัดของ ACE-Asia จากการศึกษาพบว่าประเทศจีนเป็นแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยสารมลพิษ มีค่าปริมาณสารที่ปลดปล่อยเป็นดังนี้ คือ มีการปล่อย  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , NMVOC, BC, OC และ  $\text{NH}_3$  เท่ากับ 20.4, 11.4, 3820, 116, 38.4, 17.4, 1.05, 3.4 และ 13.6 Tg ตามลำดับ ในการบอกตำแหน่งแหล่งกำเนิดสาร จะใช้การบอกพิกัดเป็นละติจูด ลองจิจูด สำหรับแหล่งกำเนิดชนิด LPS และใช้การบอกตำแหน่งตามวิธีการวัดการกระจายแบบ Surrogate GIS สำหรับแหล่งกำเนิดประเภทอื่นๆ เช่น แหล่งอาศัยของประชากรทั้งในเมืองและในชนบท ถนนทั้งสายหลักและสายย่อย และเรือ เป็นต้น การบอกตำแหน่งของการปลดปล่อยสารมลพิษนี้มีความสำคัญมากต่อข้อมูลเบื้องต้น (Input data) ในการศึกษา เปรียบเทียบ และสังเกตการณ์ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับบรรยากาศ โดยที่ค่าปริมาณการปลดปล่อยสารมลพิษออกสู่บรรยากาศนี้จะเป็นค่าโดยประมาณ ที่มีการจัดทำขึ้นปีละครั้ง ในช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนของข้อมูลการปลดปล่อยสารต่างๆ เหล่านี้ มีค่าเท่ากับ 95% โดยมีค่าพิสัยแตกต่างกัน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนต่ำสุดในการวัด  $\text{SO}_2$  มีค่าเท่ากับ  $\pm 16\%$  และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนสูงสุดในการวัด OC มีค่าเท่ากับ  $\pm 450\%$

## 2.2.2 งานวิจัยในประเทศ

Granat et al., 1995 ได้ศึกษาภายใต้โครงการร่วมกันระหว่าง ไทย - สวีเดน ภายใต้กรอบการทำงานของโครงการ IGAC/DEBITS ทำการเก็บตัวอย่างน้ำฝนด้วยอุปกรณ์ Automatic wet only collector เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของน้ำฝน ที่ 2 สถานี คือ เขื่อนศรีนครินทร์ ซึ่งตั้งอยู่ทางภาคตะวันตก และเขื่อนน้ำปิง ซึ่งตั้งอยู่ทางภาคตะวันออก กำหนดเป็นตัวแทนพื้นที่ในแถบชนบทของประเทศไทย เป็นรายวัน ตั้งแต่กลางปีจนถึงสิ้นปี 1991 พบว่า ข้อมูลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ ในแต่ละวัน เป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทาง การเคลื่อนที่ และการกระจายของแหล่งกำเนิดมลสารในอากาศ ในวันที่ปริมาณน้ำฝนน้อย จะมีความเข้มข้นของไอออนต่างๆ น้อยกว่าวันที่ปริมาณน้ำฝนมาก

ปริมาณความเข้มข้นของไอออนของทั้ง 2 สถานี มีความคล้ายคลึงกัน แต่ไม่มีความสัมพันธ์กัน ระหว่างวันที่ทำการเก็บตัวอย่าง เป็นผลเนื่องจากระยะห่างระหว่าง 2 สถานี ซึ่งอยู่ใกล้กันถึง 500 กิโลเมตร และมีความสัมพันธ์ซึ่งกันระหว่างความเข้มข้นของไอออน คือ ระหว่าง  $H^+$  และ  $SO_4^{2-}$  ระหว่าง  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$  และ  $Ca^{2+}$  และระหว่าง  $NH_4^+$  และ  $NO_3^-$  ตัวอย่างส่วนใหญ่จะมีความเป็นกรดเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความไม่สมดุลของค่าความเข้มข้นต่างๆ เหล่านี้

วินัย สมบูรณ์ , 2539 ได้ตรวจวัดค่าความเป็นกรดของน้ำฝนและคุณภาพน้ำฝนในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยการเก็บตัวอย่างน้ำฝนในช่วงฤดูฝนของปี พ.ศ. 2536 ด้วยการวางถึงพลาสติกรับน้ำฝนกลางแจ้ง โดยในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งได้แบ่งการเก็บน้ำฝนออกเป็น 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างน้ำฝนในช่วง 5 นาทีแรก ในช่วง 15-20 นาทีแรก และในช่วง 30-60 นาทีแรก จนได้ปริมาตร 1 ลิตร ผลการวิเคราะห์พบว่า น้ำฝนมี pH ค่าต่ำกว่า 5.6 และเมื่อเวลาผ่านไป 15-20 นาที น้ำฝนมีค่า pH สูงขึ้น เนื่องจากสารมลพิษต่างๆ ถูกชะล้างออกจากบรรยากาศแล้ว และโดยภาพรวมของคุณภาพน้ำฝนนั้นมีลักษณะเป็นฝนกรด มีระดับของตะกั่วและแคดเมียมสูง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัยโลก พบว่าไม่เหมาะสำหรับการนำไปดื่มหรือนำไปประกอบอาหาร ค่า pH และค่าความเข้มข้นไอออนต่างๆ เป็นดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 คุณภาพน้ำฝนเฉลี่ยในกรุงเทพฯ และปริมณฑลที่ตรวจวัดในปี พ.ศ. 2536

จุดเก็บตัวอย่าง	จำนวนครั้งที่ฝนตก	pH		ซัลเฟต $SO_4^{2-}$ (ppm)	คลอไรด์ $Cl^-$ (ppm)	แคดเมียม $Cd^{2+}$ (ppm)	ตะกั่ว $Pb^{2+}$ (ppm)	สังกะสี $Zn^{2+}$ (ppm)
		0-5 นาที	15-20 นาที					
1	5	4.6	5.1	83.2	1.8	11.7	160.5	51.5
2	2	4.6	4.7	128.7	4.2	21.6	193.8	83.1
3	1	4.6	5.0	107.6	4.6	40.1	173.4	77.4
4	1	4.7	5.0	179.6	0.5	23.1	193.8	115.6
5	1	5.0	6.1	18.0	3.4	73.4	571.2	105.4
6	1	5.8	5.0	86.0	1.6	42.2	350.2	59.4
7	1	4.7	5.5	138.3	3.2	23.8	183.6	40.1
8	1	5.5	5.5	249.8	2.8	27.9	370.6	115.6
9	1	5.3	5.8	107.6	4.6	6.9	122.4	66.0

ที่มา : วินัย สมบูรณ์, 2539

ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม (ERTC), 2542 ได้ตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของน้ำฝน โดยใช้หลักเกณฑ์ของ EANET โดยเก็บตัวอย่างน้ำฝนด้วยอุปกรณ์ Automatic wet-dry sampler collector และเก็บตัวอย่าง Wet-dry deposition ด้วย Bulk collector ในช่วงเดือนมกราคม – ตุลาคม พ.ศ. 2542 และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ด้วยวิธี Ion chromatography ผลการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลทางสถิติพบว่าค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในน้ำฝนมีความถูกต้องในการตรวจวัด  $\pm 15\%$  ยกเว้นแคลเซียมไอออน ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้มีปัญหาเนื่องมาจากคุณภาพของน้ำ Deionized ที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ตัวอย่าง และพบว่าค่า pH ของน้ำฝนมีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 5.12 โดยมีค่าต่ำกว่า 5.0 ถึง 42% ผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างน้ำฝนเป็นดังตาราง 11

ตาราง 11 ค่าองค์ประกอบทางเคมีเฉลี่ยของน้ำฝนที่วัดได้ที่ ERTC ในปี พ.ศ. 2542

Sample	Na <sup>+</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	K <sup>+</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	Mg <sup>2+</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	Ca <sup>2+</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	Cl <sup>-</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu\text{eq/l}$ )	pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )
Bulk	16.46	32.27	3.19	7.23	48.09	12.63	25.43	47.58	5.24	18.02
Wet	11.03	43.02	2.99	4.13	29.49	12.28	25.77	55.93	5.06	19.76

ที่มา : ERTC, 2542

เนาวรัตน์ รักษาการ, 2544 ศึกษาการตกสะสมของสารกรดในจังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างการตกสะสมแบบเปียกด้วยอุปกรณ์ Wet only collector และเก็บตัวอย่างการตกสะสมแบบแห้งด้วยอุปกรณ์ 4-Stage filter pack พบว่า น้ำฝนมีค่า pH เฉลี่ยในช่วง 12 เดือน เท่ากับ 5.6 เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของไอออนที่ทำการตรวจวัดพบว่า Na<sup>+</sup> มีปริมาณสูงสุด เท่ากับ 23.9  $\mu\text{eq/l}$  รองลงมาได้แก่ Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> และ K<sup>+</sup> มีค่าเท่ากับ 23.4, 16.1, 14.1, 16.2, 12.2, 8.8, 7.5 และ 3.1  $\mu\text{eq/l}$  ตามลำดับ อัตราส่วนของ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> เท่ากับ 0.58 แสดงว่าความเป็นกรดของน้ำฝนเกิดจากสารประกอบซัลเฟอร์มากกว่าสารประกอบไนโตรเจน สัดส่วนของ (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) / (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) เท่ากับ 2.03 แสดงว่า Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> และ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ไอออน ทำให้น้ำฝนถูกทำให้เป็นกลาง ปริมาณการตกสะสมของสารกรดเปียก SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> เท่ากับ 21.8 และ 11.2  $\text{meq/m}^2\cdot\text{yr}$  จากการศึกษการตกสะสมแบบแห้ง พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซ NH<sub>3</sub> ในบรรยากาศมีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 138.7  $\text{nmol/m}^3$  รองลงมาได้แก่ก๊าซ HCl, SO<sub>2</sub> และ HNO<sub>3</sub> มีค่าเฉลี่ยเป็น 49.1, 18.5 และ 11.6  $\text{nmol/m}^3$  ตามลำดับ ความเร็วการตกสะสมของก๊าซ SO<sub>2</sub> และ HNO<sub>3</sub> เท่ากับ 0.33 และ 0.46  $\text{cm/s}$  ปริมาณ

การตกสะสมของสารกรดแห้ง  $\text{SO}_2$  และ  $\text{HNO}_3$  เท่ากับ 5.27 และ 4.62  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการตกสะสมของสารกรดเปียกและสารกรดแห้ง พบว่า ปริมาณการตกสะสมของสารกรดเปียกสูงกว่าสารกรดแห้งประมาณ 6 เท่า ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการตกสะสมกรดเป็นดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 ค่าปริมาณการตกสะสมกรดบริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา ปี 2544

สารกรด	การตกสะสมเปียก ( $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ )	การตกสะสมแห้ง ( $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{yr}$ )
การตกสะสมของซัลเฟออร์	349.4	61.5
การตกสะสมของไนโตรเจน	157.0	23.6
รวม	506.4	85.1

ที่มา : เนาวรัตน์ รักษาการ, 2544

Japan International Cooperation Agency (JICA), 2003 จัดทำโครงการสำรวจการตกสะสมของกรดที่เกิดขึ้นภายในประเทศไทย ภายใต้ความร่วมมือระหว่าง EANET, กรมควบคุมมลพิษ และ ERTC พบว่าค่า pH ของน้ำฝนที่ตรวจวัดได้ในปี 2000 เป็นดังแสดงในตาราง 13 และมีค่าปริมาณการตกสะสมของสารกรดเนื่องมาจากซัลเฟออร์ ทั้งจากค่าที่ตรวจวัดได้จริงและค่าที่ประเมินได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ATMOS2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 13 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำฝนที่ตรวจวัดได้ที่สถานีต่างๆ ในปี 2000

	OEPP	TMD	ERTC	Khao Laem	For 4 sites
Min.	3.91	4.18	4.43	5.10	3.91
Max.	6.99	6.42	6.95	6.19	6.99
Mean	5.10	5.19	6.07	5.72	5.44
Median	4.89	5.15	6.19	5.77	5.38

ที่มา : JICA, 2003

จากการประเมินสถานการณ์การตกสะสมกรดในประเทศไทยด้วยแบบจำลอง ATMOS2 ยังพบอีกว่า ในปี 2000 มีการตกสะสมกรดมากที่สุดสำหรับพื้นที่ในเขตเมืองใหญ่ อยู่ในเขตพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและสมุทรปราการ โดยมีค่าการตกสะสมกรดเปียกเท่ากับ 1756  $\text{mg-S}/\text{m}^2$  และมีค่า

การตกสะสมรวมเท่ากับ  $3329 \text{ mg-S/m}^2$  และมีการตกสะสมมากกว่า  $2000 \text{ mg-S/m}^2$  อยู่ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร มีค่าความเข้มข้นของ  $\text{SO}_2$  ในอากาศสูงสุด  $3.89 \text{ ppb}$  ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล เมื่อพิจารณาพื้นที่ส่วนมากของประเทศซึ่งเป็นพื้นที่เขตชนบทพบว่ามีการตกสะสมสูงสุดในพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทราและจังหวัดชลบุรี โดยมีค่าการตกสะสมคิดเป็นยกเท่ากับ  $642 \text{ mg-S/m}^2$  และมีค่าการตกสะสมรวมเท่ากับ  $959 \text{ mg-S/m}^2$  และเมื่อใช้แบบจำลอง ATMOS2 ทำนายค่าปริมาณการตกสะสมของกรดในประเทศไทยในปี 2011 พบว่าพื้นที่ที่มีการตกสะสมสูงสุดในเขตเมืองใหญ่ยังคงเป็นกรุงเทพมหานคร มีค่าการตกสะสมลดลงจากปี 2000 มีค่าเท่ากับ  $3062 \text{ mg-S/m}^2$  แต่กลับมีค่าความเข้มข้นของ  $\text{SO}_2$  ในอากาศเพิ่มขึ้นเป็น  $4.54 \text{ ppb}$  และเมื่อพิจารณาพื้นที่ส่วนมากของประเทศ การตกสะสมกรดยังคงมากที่สุดที่จังหวัดฉะเชิงเทราและจังหวัดชลบุรี มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $1185 \text{ mg-S/m}^2$

ตาราง 14 ค่าปริมาณการตกสะสมของกรดเนื่องจากซัลเฟอร์ที่สถานีต่างๆ ในปี 2000

	OEPP	TMD	ERTC	Khao Laem
Precipitation (mm/yr)	1144.3	975.0	941.3	881.3
Calculated ( $\text{mg-S/m}^2/\text{yr}$ )	833.0	744.2	498.8	25.7
Measured ( $\text{mg-S/m}^2/\text{yr}$ )	776.9	777.8	573.6	87.0

ที่มา : JICA, 2000

กรมควบคุมมลพิษ, 2547 ศึกษาการตกสะสมของกรดในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศไทย ในปี 2546 โดยใช้หลักเกณฑ์ของ EANET เป็นมาตรฐานในการดำเนินงาน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำฝนด้วยอุปกรณ์ Automatic wet only collector และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ด้วยวิธี Ion chromatography ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างน้ำฝนเป็นดังแสดงในตาราง 15 และผลการวิเคราะห์ปริมาณการตกสะสมกรดเป็นดังแสดงในตาราง 16 โดยที่สถานีเก็บตัวอย่าง PCD, ERTC, VLK และ CMU คือตัวแทนของจังหวัดกรุงเทพมหานคร ปทุมธานี กาญจนบุรี (เขื่อนวชิราลงกรณ์) และเชียงใหม่ ตามลำดับ



ตาราง 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำฝน

	PCD	ERTC	VLK	CMU
pH	4.53	4.86	5.46	5.55
EC (mS/m)	1.67	1.24	0.71	0.52
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μeq/l)	37.0	24.8	7.1	9.5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μeq/l)	23.1	17.2	4.9	7.5
Cl <sup>-</sup> (μeq/l)	8.7	6.4	8.8	5.4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μeq/l)	37.5	29.1	12.5	18.2
Na <sup>+</sup> (μeq/l)	7.6	4.7	10.3	3.7
K <sup>+</sup> (μeq/l)	2.6	1.2	2.0	4.5
Ca <sup>2+</sup> (μeq/l)	23.8	12.6	16.9	13.1
Mg <sup>2+</sup> (μeq/l)	4.7	2.1	4.5	4.8

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2547

ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการตกสะสมกรด

	PCD	ERTC	VLK	CMU
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	47541	41077	7667	6673
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	29654	28437	5275	5273
Cl <sup>-</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	11153	10595	9490	3806
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	48208	48201	13470	12776
Na <sup>+</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	9841	7839	11090	2598
K <sup>+</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	3375	1933	2178	3194
Ca <sup>2+</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	30573	20902	18210	9236
Mg <sup>2+</sup> (μeq/m <sup>2</sup> )	5987	3528	4809	3354

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2547

Surapipith et al., 2003 ศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ATMOS2 ซึ่งเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายสารมลพิษในบรรยากาศระดับภูมิภาค ภายใต้ความร่วมมือระหว่างกรมควบคุมมลพิษและ JICA (Japan International Cooperation Agency) โดยใช้ข้อมูลอุตุวิทยามาในช่วงละติจูด 15S-60N ลองจิจูด 75E-160E ขนาดความละเอียด 1° x 1° ซึ่งเตรียมโดย Narisara Thongboonchu , CGRER UIowa และใช้ข้อมูลการปลดปล่อยสารมลพิษ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ Large point sources (LPS) Anthropogenic area sources และ Biomass burning area source จาก [http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION\\_DATA/index\\_16.htm](http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA/index_16.htm) ซึ่งเป็นข้อมูลที่นำมา

จากงานวิจัยของ Streets et al., 2003 หาค่าปริมาณการตกสะสมของกรดเนื่องจากซัลเฟอร์ภายในพื้นที่ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 1 – 31 ของเดือนมีนาคม กรกฎาคม ธันวาคม ปี 2001 และเดือนมีนาคม ปี 2002 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการตกสะสมกรดภายในเดือนเดียวกันของทั้ง 2 ปี จะมีความคล้ายคลึงกัน แต่ในปี 2001 มีการตกสะสมของกรดมากกว่า มีค่าการตกสะสมกรดเปียกและกรดแห้งเท่ากับ 0.416 และ 0.067  $g/m^2$  ตามลำดับ ในขณะที่ปี 2002 มีการตกสะสมกรดเปียกและกรดแห้งเท่ากับ 0.155 และ 0.043  $g/m^2$  ตามลำดับ มีการตกสะสมกรดเปียกมากที่สุดที่ตำแหน่ง 99E-19N ซึ่งอยู่ในบริเวณตอนเหนือของประเทศไทย และมีการตกสะสมกรดแห้งมากที่สุดที่ตำแหน่ง 120E-23N ซึ่งอยู่ในบริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของจีน และจากการศึกษาพบว่าในขณะนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ATMOS2 ใช้ได้กับเฉพาะการหาค่าการตกสะสมของซัลเฟอร์ อนุภาคแขวนลอยซัลเฟต และความเข้มข้นสารประกอบซัลเฟอร์ในอากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณการตกสะสมของสารอื่นๆ เช่น  $NO_x$ , Black Carbon, Organic Carbon และ NMVOC ได้ เนื่องจากส่วนใหญ่แล้วจะมีเฉพาะข้อมูลการปลดปล่อยสารมลพิษชนิด LPS ยังขาดข้อมูลชนิด Area sources ของสารต่างๆ เหล่านี้

### 3. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรด โดยการตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมีและสภาพความเป็นกรด ในรูปแบบขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างน้ำฝนและอากาศในบริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา
2. เพื่อวิเคราะห์และคำนวณหาค่าปริมาณการตกสะสมของสารกรดใน 2 รูปแบบ คือ การตกสะสมเปียก และการตกสะสมแห้ง
3. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสภาพแวดล้อม อุตุนิยมวิทยา และฤดูกาล ต่อการตกสะสมของสารกรดทั้ง 2 รูปแบบ
4. เพื่อประเมินสถานการณ์การตกสะสมของกรดในแถบพื้นที่ภาคใต้ เปรียบเทียบกับสถานการณ์การตกสะสมของกรดโดยรวมของประเทศไทย และประเทศเพื่อนบ้านในโครงการ EANET
5. เพื่อใช้เป็นข้อมูลจริงในการเปรียบเทียบกับการประเมินสถานการณ์การตกสะสมของกรด โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (ATMOS 2)
6. เพื่อจัดเก็บไว้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเมินค่าปริมาณการตกสะสมของกรด เพื่อวิเคราะห์หาค่าสภาพแนวโน้มการตกสะสมของกรดในอนาคต

7. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ATMOS2 ในการประเมินสถานการณ์การตกสะสมกรด

#### 4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมและค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ศึกษา ทางด้านลักษณะภูมิประเทศ แหล่งกำเนิดสารมลพิษ และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา
2. กำหนดจุดเก็บตัวอย่าง ตามหลักเกณฑ์ข้อกำหนดของเครือข่ายติดตามตรวจสอบการตกสะสมกรดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียง
3. ดำเนินการเก็บตัวอย่างการตกสะสมกรดเปียกและกรดแห้ง และวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ควบคู่กับการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล
4. วิเคราะห์ข้อมูลและประเมินสถานการณ์การตกสะสมของกรดบริเวณพื้นที่ศึกษา
5. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ATMOS2 มาประเมินสถานการณ์การตกสะสมของกรดบริเวณพื้นที่ศึกษา และเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับข้อมูลการตกสะสมกรดในอดีตที่มีผู้ศึกษาไว้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้

#### 5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสถานการณ์การตกสะสมของสารกรด สภาพแนวโน้มปัญหาและความรุนแรง ตลอดจนศักยภาพในการรองรับการตกสะสมของกรด ในบริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นตัวแทนแถบพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อสถานการณ์การตกสะสมของสารกรด
3. ทำให้ทราบถึงความถูกต้องและแม่นยำของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการประเมินสถานการณ์การตกสะสมกรด
4. สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินค่าปริมาณการตกสะสมของกรดซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้
5. สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการกำหนดระดับการปลดปล่อยสารมลพิษต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการตกสะสมของกรดได้
6. สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการหาวิธีป้องกันการเกิดปัญหาฝนกรดในอนาคตได้