

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuels) ทำให้เกิดสารพิษบางชนิดเกิดขึ้น ได้แก่ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เมื่อก๊าซทั้ง 2 ชนิดนี้ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ จะกลายสภาพเป็นสารกรด และจะถูกพัดพาไปได้ไกลอย่างไร้พรมแดน จะส่งผลให้หมอก น้ำค้าง ฝน มีสภาพเป็นกรด ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของภูมิภาค และของโลก สารกรดในชั้นบรรยากาศ เหล่านี้ได้สร้างความเสียหายต่อสุขภาพ ทรัพย์สิน โบราณสถาน แหล่งผลิตอาหาร และทรัพยากรธรรมชาติ จึงต้องแสวงหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยมลพิษ และบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้น ประเทศไทย เป็นส่วนหนึ่งในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่มีการพัฒนาด้านเศรษฐกิจ และสังคมในอัตราที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ชุมชนเมือง อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่งมีการขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมาก ปัญหาเรื่องสารกรดจึงได้เริ่มปรากฏมากขึ้นโดยพบว่า น้ำฝนที่ตกลงมาในธรรมชาติมีความเป็นกรดสูงกว่าน้ำฝนธรรมชาติ สำหรับประเทศไทยปัญหานี้อาจทวีความรุนแรงขึ้นได้ในอนาคต เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้ว ซึ่งสารกรดสามารถเดินทางไปในชั้นบรรยากาศได้หลายร้อยกิโลเมตรจากแหล่งกำเนิด

2.1 ความหมายและความรู้พื้นฐานของฝนกรด

ปกติตามธรรมชาติจะไม่ใช้น้ำบริสุทธิ์ แต่จะมีค่า pH เป็นกรดเล็กน้อย เพราะเมื่อไอน้ำระเหยขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศจะไปรวมตัวกับ CO_2 ที่มีอยู่ในบรรยากาศเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) แต่กรดคาร์บอนิกเป็นกรดอย่างอ่อน น้ำฝนจึงมี pH ประมาณ 5.6-5.7 ส่วนสารอื่นๆ ในบรรยากาศ เช่น ฝุ่น จะลอยตัวจากพื้นดินเข้าสู่อากาศโดยลม ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง [7] นอกจากนี้มีก๊าซอื่นๆ เช่น SO_2 (g) และ H_2S (g) สามารถเกิดตะกอน และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยังสามารถเกิดได้จากไฟฟ้า ซึ่งก๊าซเหล่านี้ได้ก่อตัวอย่างเข้มข้นแล้วทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำฝนมีค่าต่ำกว่า 5.6 จะถือว่าเป็นฝนกรด [1]

2.2 แหล่งกำเนิดและสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการตกสะสมของกรดในบรรยากาศ

สารมลพิษที่เป็นตัวทำให้เกิดสารกรดในบรรยากาศ (Acid Precursors) ที่สำคัญมีอยู่ 2 ชนิด คือ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) แหล่งที่มาของมลพิษเหล่านี้ทั้งที่เป็นแหล่งธรรมชาติ และจากแหล่งที่มนุษย์สร้างขึ้น [1, 5, 4]

2.3 แหล่งกำเนิดของการตกสะสมของสารกรด

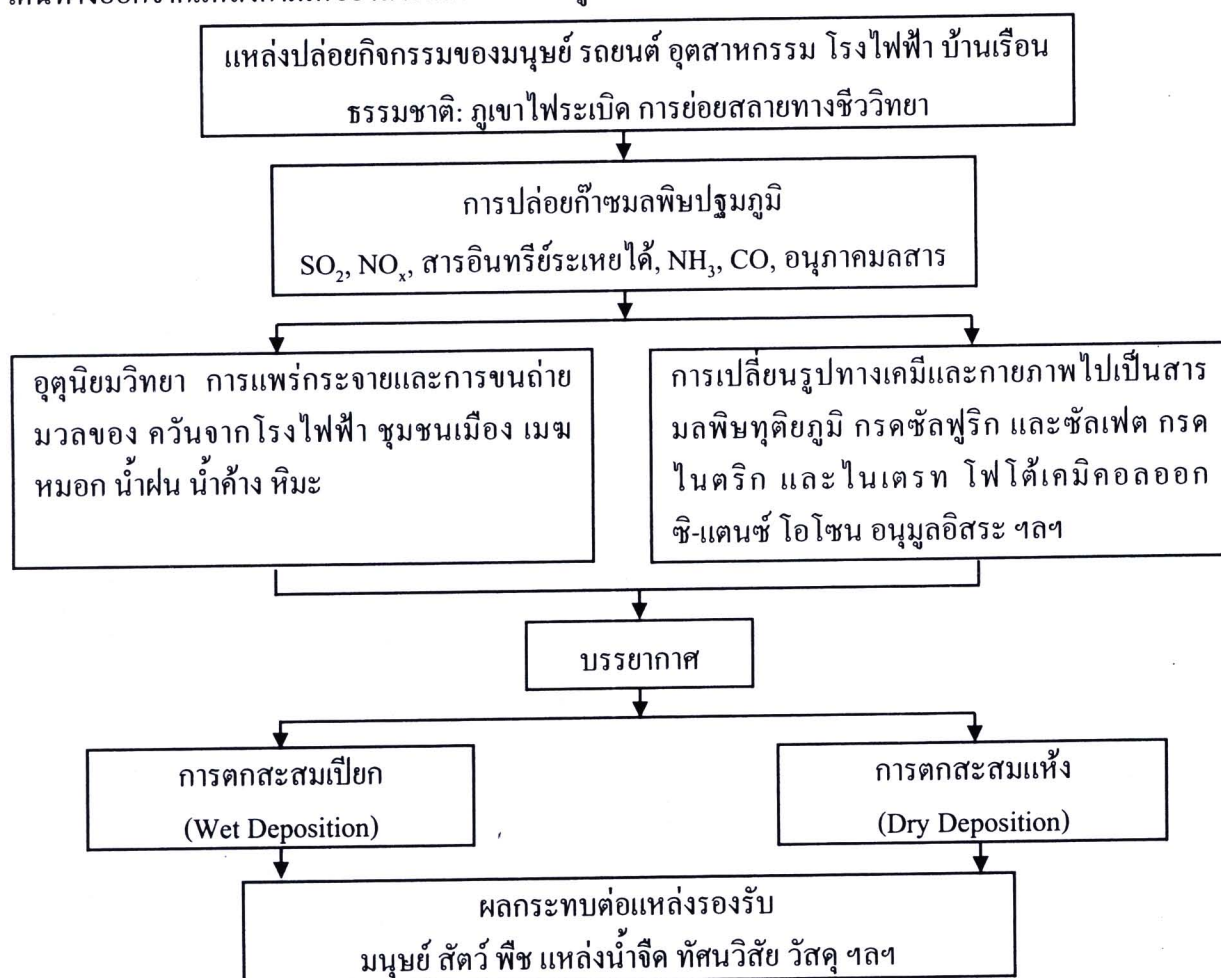
แหล่งกำเนิดของการตกสะสมของสารกรดมีด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่

2.3.1 แหล่งธรรมชาติ (Natural Sources)

ได้แก่ จากการระเบิดของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่าตามธรรมชาติ ทะเล มหาสมุทร สารอินทรีย์ประเภทต่างๆ การเน่าเปื่อยของซากพืชและซากสัตว์ เป็นต้น

2.3.2 แหล่งมนุษย์สร้าง (Man Made Sources)

ได้แก่ จากการที่มนุษย์ทำกิจกรรมต่างๆ ได้แก่ รถยนต์ อุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า บ้านเรือน การเผาขยะ การเผาไหม้เชื้อเพลิงของซากฟอสซิลประเภทต่างๆ ปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี คือสภาพทางอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) ซึ่งจะมีผลต่อการกระจาย และการเดินทางออกจากแหล่งกำเนิดของสารมลพิษด้วยดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบของมลภาวะทางอากาศและแหล่งกำเนิดของสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดสารกรดใน

บรรยากาศ [8]

2.4 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

ออกไซด์ของไนโตรเจนเป็นกลุ่มของสารประกอบหลายชนิด เช่น ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และไดไนโตรเจนออกไซด์ต่างๆ (N₂O₂, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅) แต่โดยทั่วไป NO_x มักหมายถึง NO และ NO₂ ซึ่งสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนที่สำคัญและมีปริมาณมาก NO เป็นสารตั้งต้นทำให้เกิด NO₂ และ NO₂ ยังเป็นสารตั้งต้นทำให้เกิดก๊าซมลพิษทุติยภูมิ คือ โอโซน (O₃) และ NO₂ ยังเกิดเป็นกรดไนตริกทำให้เกิดฝนกรดอีกด้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้ [3]

2.4.1 แหล่งกำเนิดของ NO_x

NO_x เกิดจากสภาวะธรรมชาติ ได้แก่ ไฟแลบ ไฟผ่า ภูเขาไฟระเบิด ปฏิกริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ในวัฏจักรไนโตรเจน และ NO_x ปริมาณมากเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะ จากการผลิตกระแสไฟฟ้า จากโรงงานอุตสาหกรรมบางโรงงาน เช่น โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตกรดอินทรีย์มี NO_x ปล่อยออกมาทั้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในโรงงาน และจากกระบวนการการผลิต

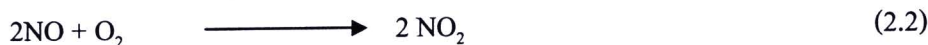
2.4.2 ปฏิกริยาเคมีของ NO_x

NO_x เกิดจากปฏิกิริยาสองแบบ คือ ปฏิกริยาเชิงความร้อน และปฏิกิริยาเคมีทางแสง ปฏิกริยาเชิงความร้อนของก๊าซไนโตรเจนเมื่อถูกออกซิไดซ์ในอากาศที่อุณหภูมิสูง > 1,500 °C (สมการที่ 2.1) ทำให้เกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ หรือเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบไนโตรเจน ทำให้เกิดการรวมตัวของไนตริกออกไซด์ (NO) กับก๊าซออกซิเจนกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงความร้อน (สมการที่ 2.2) ทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ นอกจากปฏิกิริยาเชิงความร้อนแล้ว ไนโตรเจนไดออกไซด์ยังเกิดได้ง่ายกับปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชันที่ใช้แสง (Photochemical Reaction) ของไนตริกออกไซด์ (NO) รวมกับโอโซน (O₃) สมการที่ 2.3 หรือ NO รวมกับไฮโดรคาร์บอนออกไซด์ (RO₂) สมการที่ 2.4

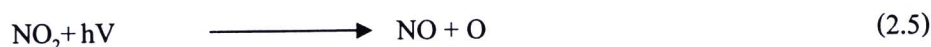
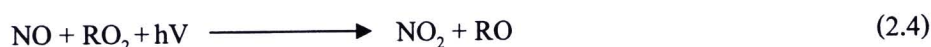
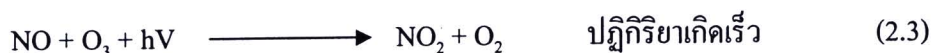
การเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ (อุณหภูมิ > 1500 °C) ปฏิกิริยาเกิดเร็ว



การเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (อุณหภูมิ > 1500 °C) ปฏิกิริยาเกิดช้า



หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทางแสง



ในบรรยากาศที่ไม่มีมลพิษ NO สลาย O_3 ในสมการที่ 2.3 ไตรเจนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชันที่แสงทำให้เกิดโอโซน (O_3) มีฝุ่นละออง โลหะหนัก หรือไฮโดรคาร์บอน (M) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่า ทั้งสามปฏิกิริยา (สมการ 2.5 และ 2.6) จะเห็นได้ว่า ทั้งสามปฏิกิริยาในสมการที่ 2.3, 2.5 และ 2.6 เป็นวงจรสมดุลตามธรรมชาติ ถ้ามีการปล่อย NO_x ส่วนเกินจากกิจกรรมของมนุษย์ออกมามากก็จะทำให้โอโซนมากขึ้น

2.5 ออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x)

SO_x เป็นกลุ่มของสารประกอบซัลเฟอร์มีหลายชนิด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นต้น SO_x เกิดจากการเผาไหม้ของกำมะถัน และจากธรรมชาติ คือ ภูเขาไฟระเบิด ส่วน H_2SO_3 และ H_2SO_4 เกิดจากปฏิกิริยาของ SO_2 และ SO_3 กับน้ำ (สมการ 2.7, 2.8 และ 2.9) เป็นสาเหตุทำให้เกิดฝนกรดในบรรยากาศ [3]

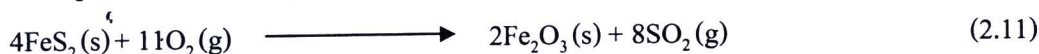


ในวัฏภาคของเหลวเกิดในเมฆ



2.5.1 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

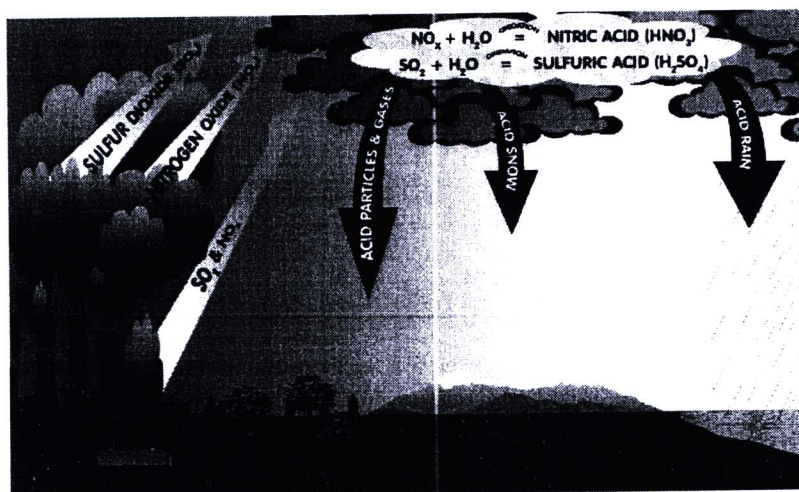
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ละลายน้ำได้ การเผาไหม้ถ่านหินในอากาศซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดซ์โดยก๊าซออกซิเจนทำให้เกิด SO₂ ดังสมการที่ 2.10 ประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดที่ปล่อยสู่บรรยากาศมาจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ และจากการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ประมาณร้อยละ 87-94 มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม ซัลเฟอร์ที่ถูกปล่อยออกมาเกือบทั้งหมดอยู่ในรูป SO₂ ในกรณีของถ่านหิน สารประกอบซัลเฟอร์ส่วนใหญ่ปะปนอยู่ในรูปของไอรอนไพไรต์ (Ironpyrite: FeS₂) หรือเหล็กซัลไฟด์ เมื่อนำสารนี้มาเผา FeS₂ ถูกออกซิไดซ์เป็น SO₂ (สมการที่ 2.11) [3, 4]



ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม ความรุนแรงของผลกระทบขึ้นกับปริมาณและระยะเวลาที่ได้สัมผัส การได้รับ SO₂ ความเข้มข้นสูงมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ถ้าได้รับปริมาณน้อยแต่เป็นเวลานานอาจทำให้เป็นโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง คนส่วนใหญ่จะเริ่มมีอาการไอ และระคายเคืองคอ เมื่อรับสัมผัส SO₂ ประมาณ 5 ppm (13,000 µg m⁻³) เป็นระยะเวลา 3 นาที ถึง 3 ชั่วโมง และถ้ายังก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รวมตัวกับฝุ่นละอองอาจจะมีผลกระทบต่อสุขภาพมากขึ้น

2.6 การตกสะสมของกรด (Acid Deposition)

การตกสะสมของกรดเกิดได้ 2 วิธี คือ การตกสะสมแบบเปียกและการตกสะสมแบบแห้ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การตกสะสมสารกรดแบบเปียกและแบบแห้ง [9]

2.6.1 การตกสะสมสารกรดแบบเปียก (Wet Deposition)

การตกสะสมสารกรดแบบเปียกเป็นปริมาณของสารกรดที่เคลื่อนย้ายจากบรรยากาศโดยฝน หิมะ หรือในรูปอื่นๆ ลงสู่พื้นโลก [1] และเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอากาศ ของเหลว และของแข็ง จากบรรยากาศลงสู่พื้นโลก ในระหว่างเกิดฝนตกโดยทั่วไปปรากฏในรูปฝนกรด ที่มีสาเหตุมาจากกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก (จากการวิเคราะห์น้ำฝนพบซัลเฟตและไนตริกเป็นหลัก) โดย SO_2 , SO_3 , NO_2 ทำปฏิกิริยาและละลายอยู่ในเมฆ น้ำฝน ในรูปแบบของกรดซัลฟิวริก และไนตริก การตกสะสมสารกรดแบบเปียกเกิดได้ 2 วิธี [2]

Rainout: สารทั้งที่เป็นอนุภาคและก๊าซในบรรยากาศจะรวมตัวอยู่ในเมฆ แล้วตกลงมาสู่ผิวโลกพร้อมกับฝน

Washout: ฝนจะตกลงมากระทบกับสารกรดที่แห้ง (Dry Deposition) แล้วตกลงมาสู่ผิวโลกพร้อมกับฝน

2.6.2 การตกสะสมสารกรดแบบแห้ง (Dry Deposition)

การตกสะสมสารกรดแบบแห้งเป็นการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคและก๊าซที่เป็นกรดทุกชนิด เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรืออนุภาคซัลเฟตที่ตกตะกอนสะสมจากบรรยากาศในสภาวะที่ไม่มีฝนหรือหิมะ ตกลงสู่พื้นโลก เช่น การดูดซับหรือการดูดซับก๊าซโดยพืช ดิน น้ำ และผิววัสดุต่างๆ ที่มนุษย์ผลิตขึ้น การตกตะกอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกของอนุภาคที่ค่อนข้างหยาบ การชนของอนุภาคละเอียดบนผิววัสดุหรือพืช การตกสะสมของกรดแบบแห้งเป็นกระบวนการซับซ้อน เพราะความเร็วของการตกสะสมของก๊าซ และอนุภาคต่างๆ ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง รวมทั้งปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา และลักษณะทางภูมิประเทศของแต่ละท้องถิ่น [10] ซึ่งค่าความเร็วในการตกสะสม (Deposition Velocity, V_d) ดังสมการ

$$\text{Deposition Velocity } (V_d) = \frac{\text{อัตราการไหลของมวลสารพิษ } (\mu\text{g/s})}{\text{พื้นที่ผิว } (\text{m}^2) \times \text{ความเข้มข้น } (\mu\text{g/m}^3)} \quad (2.12)$$

ค่าความเร็วของการตกสะสมมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ [11] ได้แก่

- 1) คุณสมบัติของวัตถุ เช่น ความดันไอ ขนาด โครงสร้าง รูปร่าง และความขรุขระของผิวสัมผัส
- 2) ปัจจัยทางกายภาพและทางอุตุนิยมวิทยา เช่น ความดันไอ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางของลม
- 3) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารพิษแต่ละชนิด เช่น ความเข้มข้นที่มีในบรรยากาศ การเกิดปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

2.7 จุลอุตุนิยมวิทยา (Micrometeorology)

จุลอุตุนิยมวิทยา เป็นกล่าวถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในท้องถิ่นหนึ่งๆ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ด้านอุตุนิยมวิทยาที่เกิดจากปัจจัยในท้องถิ่นนั้นๆ เช่น การที่ลมพัดผ่านภูเขาสูงหนึ่ง ทำให้ทิศทาง และความเร็วลมเปลี่ยนไป หรือการที่อากาศในหุบเขามีความเย็นจัดจนไม่มีการเคลื่อนไหวที่เห็นได้ชัด ความแตกต่างระหว่างจุลอุตุนิยมวิทยากับอุตุนิยมวิทยาก็คือ จะต้องเป็นเหตุการณ์ในพื้นที่จำกัดซึ่งอาจมีระยะทางเพียงไม่กี่ร้อยเมตรจนถึงหลายๆ กิโลเมตรก็ได้ แต่เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่เฉพาะเท่านั้น ไม่ได้เกิดขึ้นทั่วไปทั้งประเทศหรือภูมิภาค ส่วนที่สำคัญของจุลอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ลม (ความเร็วและทิศทาง) และการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศ

ทางด้านกายภาพ อากาศจัดว่าเป็นของไหลที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความกดดันด้วยตัวเองได้ (Incompressible Fluid) กล่าวคือ เมื่อลมพัดไปยังสิ่งกีดขวาง ย่อมหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง หากไหลไปในช่องแคบ ย่อมมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของพื้นที่ที่ลดลง เป็นต้น และอาจมีปรากฏการณ์ต่างๆ เช่นเดียวกับของไหลต่างๆ ไป เช่น เกิดการปั่นป่วน (Turbulence) เกิดแรงเสียดทาน (Friction) การลอยตัว (Buoyancy) และที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ มีการกระจายตัวผสมผสานกันตลอดเวลา ซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศทั้งสิ้น มลพิษทางอากาศถือเป็นสิ่งเล็กน้อยมากที่ปะปนกับอากาศ ดังนั้น ตัวมันเองยังไม่มีผลต่อสภาพอุตุนิยมวิทยาอย่างสำคัญ แต่อากาศจะเป็นตัวกำหนดสภาพการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศ จึงจำเป็นต้องเข้าใจและจำลองสภาพอากาศในส่วนนี้ให้ได้ หากจะกำหนดขอบเขตสภาพทางจุลอุตุนิยมวิทยา อาจกำหนดได้ดังนี้ [12]

- 1) ความสูงจากระดับพื้นดิน ที่ระยะความสูงประมาณ 1,500 เมตร เป็นความสูงที่จัดว่าอิทธิพลของภูมิประเทศจะมีอยู่เพียงไม่เกินระดับนี้ เพราะที่ความสูงมากกว่านี้ ความเร็ว ทิศทางลมและอุณหภูมิจะเป็นไปโดยอิสระไม่ขึ้นกับภูมิประเทศเบื้องล่าง การแพร่กระจายของมลพิษต่างๆ ในอากาศก็มักจะอยู่ในระดับไม่เกิน 1,500 เมตร จากพื้นดินเช่นกัน ยกเว้นกรณีที่เป็นมลพิษจากภูเขาไฟลูกใหญ่ๆ ที่พ่นขึ้นไปด้วยความเร็วที่สูงกว่าปกติมาก
- 2) การแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศ ไม่ว่าจะมาจากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม จะขึ้นกับสภาพอุตุนิยมวิทยาเดียวกันทั้งสิ้น (เพราะถือว่ามลพิษทางอากาศเป็นเพียงสิ่งปนเปื้อนเล็กน้อยในอากาศส่วนใหญ่) ขอบเขตทางด้านระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่อาจจัดได้ว่าเป็นสภาพทางอุตุนิยมวิทยาแบบเดียวกัน อยู่ในระดับกิโลเมตร เช่น องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) กำหนดให้พิจารณาสภาพภูมิประเทศและการใช้ที่ดินรอบๆ แหล่งกำเนิดเมื่อจะพิจารณาว่าควรจะเป็นสภาพอุตุนิยมวิทยาแบบเมืองหรือชนบท โดยใช้ระยะ 3 กิโลเมตรโดยรอบ เป็นต้น

3) ข้อสรุปสำคัญที่ได้จากจุลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ สภาพอุตุนิยมวิทยาที่ตรวจวัดได้จาก สถานีอุตุนิยมวิทยาท้องถิ่น และข้อมูลความเสถียรของบรรยากาศ ทิศทางและความเร็วลม

2.7.1 การเคลื่อนที่ของมวลอากาศ

ลักษณะการไหลของของไหลนั้น ค่าความหนืด (Viscosity) จะมีบทบาทมาก เช่นเดียวกับความหนาแน่นของของไหล และขึ้นกับอุณหภูมิของของไหลนั้น สิ่งหนึ่งที่สำคัญมากก็คือ ระยะทางที่อาจมีผลต่อการแปรสภาพลักษณะของการไหลของของไหล คือ ไหลจากแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) กล่าวคือ ถึงแม้ว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบราบเรียบก็ตาม ถ้าระยะการไหลของของไหลนั้นไหลเกินไปมีผลทำให้การไหลนั้นเปลี่ยนไปได้ ดังนั้นค่าความยาวหรือระยะทางมีผลอย่างเห็นได้ชัด คือถ้าค่าของความยาวยิ่งมากมีผลทำให้ค่า Reynolds Number มากไปด้วย นั่นคือ มีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ระยะทางระหว่างจุดสองจุดที่มีความจำกัด เกิดความคิดกับนักอุตุนิยมวิทยาในการตั้งสถานีหรือเครื่องวัดค่าทางอุตุนิยมวิทยาทั้งหลายนั้น ต้องมีระยะทางเหนือลมขึ้นไปประมาณ 50-100 เท่าของความสูงจากผิวขึ้นไปถึงจุดที่วัดข้อมูล อย่างไรก็ตาม ระยะเหนือที่ว่านี้ต้องราบเรียบตามทฤษฎี ระยะนี้เรียกว่า Fetch หรือ Fetch Effect คือ ต้องเป็นระยะที่ไกลพอ มีความราบเรียบมากหรือเป็นที่ราบเปิดกว้าง

2.7.2 พารามิเตอร์บรรยากาศ (Atmospheric Parameter)

บรรยากาศประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดรวมกัน อีกทั้งผสมด้วยธาตุที่ปะปนในลักษณะ Condensation Nuclei ส่วนประกอบเหล่านี้มีบทบาทต่อการควบคุมอุณหภูมิและเปลี่ยนแปลงบรรยากาศจากลักษณะหนึ่งไปสู่ลักษณะหนึ่ง แต่มีใช้ว่าก๊าซและสารต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศจะมีบทบาทมากขึ้นไป ความจริงแล้วยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลอย่างมาก ซึ่งอาจจะเป็นผลจากส่วนประกอบของอากาศเหล่านั้น หรืออาจเกิดจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นนี้มีอิทธิพลทำให้สภาวะต่างๆ ของอากาศเปลี่ยนแปลงไปก็คือ อุณหภูมิ ความชื้น และลักษณะลม ทั้งสามลักษณะนี้เป็นส่วนหนึ่งที่เรียกว่า Atmospheric Parameters นอกเหนือจากรังสีความร้อนและฝน อากาศเหนือผิวดินนั้น มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตอย่างมาก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ [12]

2.7.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่ชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายความร้อนด้วยกระบวนการ Conduction โดยข้อเท็จจริงแล้วอุณหภูมิของอากาศมีอิทธิพลจากส่วนที่เป็น Sensible Heat (H) เพราะเป็นความร้อนที่แผ่ผลจากอากาศหรือถ่ายเทออกสู่อากาศ และเป็นความร้อนที่เหลือจากการถูกใช้ไปในส่วนต่างๆ แล้ว โดยมีข้อสันนิษฐานไว้ว่า กระบวนการทำให้เกิด Sensible Heat เกิดจากการร่วมกันของกระบวนการ คือ ขั้นแรกที่ได้ผิวผิวดินด้วยกระบวนการ Conduction มีส่วนอย่างมาก ส่วนที่สูงขึ้นไป

คือ กระบวนการ Convection และเป็นการยากที่จะกำหนดว่าความสูงเท่าใดที่กระบวนการ Convection จะมีอิทธิพลมาก ดังนั้น การวัดอุณหภูมิของอากาศ จึงนิยมวัดที่สูงจากผิวดินประมาณ 1-2 เมตร เพราะจะได้ผลของอุณหภูมิที่เป็น Sensible Heat และจะไม่คำนึงถึง Soil Heat Flux

อุณหภูมิที่ใช้ประกอบในการแสดงค่าหรือดัชนีของอุณหภูมินั้น จำเป็นต้องทำการวัดอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Temperature) อุณหภูมิต่ำสุด (Minimum Temperature) และอุณหภูมิระยะเวลาด้วย สิ่งเหล่านี้จึงนำมาใช้ในการศึกษา สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (Mean Daily Temperature) เป็นอุณหภูมิของอากาศ โดยหาจากค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของวัน ซึ่งหมายถึง ค่าครึ่งหนึ่งของผลบวกของอุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิสูงสุด
- 2) อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (Mean Monthly Temperature) หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละวัน ประกอบกับเป็นจำนวนเดือนนั้น ถ้าจะพูดให้ง่ายก็คือ เป็นอุณหภูมิที่เกิดจากการเฉลี่ยของอุณหภูมิรายวันทั้ง 30 วันของเดือน
- 3) อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (Mean Annual Temperature) อุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 12 เดือน
- 4) อุณหภูมิปกติโดยเฉลี่ย (Mean Normal Temperature) เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้มีการเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยนั้น เป็นเวลานานพอที่ถือได้เป็นอุณหภูมิปกติ โดยทั่วไปแล้วควรเก็บข้อมูลเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 25 ปี

2.7.2.2 ความชื้นในบรรยากาศ

ความชื้นในบรรยากาศ (Atmospheric Moisture) บนผิวโลกไม่ว่าบรรยากาศจะมีลักษณะแห้งหรือชุ่มชื้น ความชื้นในบรรยากาศย่อมมีเสมอ ระดับความชื้นในอากาศจะเป็นตัวบอกปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งมันอาจเป็นไปได้ทั้งค่าจริงและค่าเปรียบเทียบ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ โดยปกติความชื้นในอากาศจะมีอยู่หลายรูปแบบที่สำคัญ เช่น ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) โดยเฉพาะความชื้นสัมพัทธ์เป็นรูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่รู้จักกันมากที่สุด โดยนิยามของค่าความชื้นสัมพัทธ์คือ อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำจริงในอากาศขณะใดขณะหนึ่ง ต่อปริมาณมากที่สุดที่เป็นไปได้ ขณะอากาศเกิดการอิ่มตัว หรือคำนวณจาก

$$\text{Relative Humidity} = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (2.13)$$

เมื่อ e คือ Actual Vapor Pressure มักมีหน่วยเป็นมิลลิบาร์และ e_s คือ Saturated Vapor หรือเป็นปริมาณความชื้นที่อาจจะมิได้สูงที่อุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น มีหน่วยเช่นเดียวกับความชื้นจริง (e) หรือ มิลลิบาร์

อากาศอิ่มตัว (Saturated Air) คืออากาศที่มีสมดุลระหว่างการได้รับไอน้ำจากการระเหย และการสูญเสียไอน้ำจากการควบแน่นที่อุณหภูมินั้นๆ ดังนั้นถ้าอากาศยังมีปริมาณไอน้ำต่ำกว่าค่าสมดุลดังกล่าว มันจะยังสามารถรับไอน้ำจากการระเหยเข้าไปได้เรื่อยๆ จนกว่าจะถึงจุดสมดุลของมันที่อุณหภูมินั้น ด้วยเหตุนี้จุดอิ่มตัวของอากาศจึงเป็นจุดที่ มันสามารถรองรับไอน้ำไว้ได้มากที่สุด ซึ่งปริมาณของไอน้ำสูงสุดที่เป็นไปได้ดังกล่าว จะขึ้นกับอุณหภูมิของอากาศขณะนั้นๆ เป็นหลัก คือ ยังมีอุณหภูมิต่ำ มันจะยังรองรับไอน้ำได้มากยิ่งขึ้นก่อนจะถึงจุดอิ่มตัวของมัน ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์จึงไม่ใช่ตัวบอกปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในบรรยากาศขณะนั้น แต่เป็นค่าเปรียบเทียบของไอน้ำที่มีอยู่เมื่อเทียบกับจำนวนไอน้ำมากที่สุดที่มีได้ ในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น หรือการที่ความชื้นสัมพัทธ์จะเป็นตัวบ่งบอกระดับหรือเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวของอากาศขณะนั้น



2.7.2.3 ลม

ลม หมายถึง อากาศในลักษณะเคลื่อนที่ ลมเกิดจากการแทนที่ของอากาศที่มีความหนาแน่นมากสู่ที่ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้โดยที่พื้นผิวโลกได้รับความร้อนแล้ว จะใช้ความร้อนเพื่อการระเหยน้ำ ทำให้อากาศมีความหนาแน่นน้อยลง ลอยตัวสูงขึ้น อากาศบริเวณใกล้เคียงจะเคลื่อนเข้าแทนที่ จึงทำให้เกิดลมขึ้น ดังนั้น การแทนที่ของอากาศบริเวณใกล้เคียงนั้นจะเป็นไปทุกๆ ด้าน หรืออาจกล่าวได้ว่า ลมพัดทุกทิศทุกทาง ที่สำคัญคือ 3 ด้าน หรือเป็น 3 Dimensions คือด้านแนวแกน X, Y และ Z ให้ลมมีสัญลักษณ์เป็น U, V และ W ตามแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าของความเร็วลม และโดยทั่วไปแล้ว จะมีสัญลักษณ์แทนความเร็วลมดังนี้

$\bar{U}$ คือ ความเร็วลมเฉลี่ยตามแนวแกน X ที่วัดเป็นเวลานาน

u' คือ ค่าลมที่มีการเปลี่ยนแปลงในเวลาสั้น

U คือ ลมที่มีความเร็วในเวลาใดเวลาหนึ่ง

$$U = \bar{U} + u' \quad (2.14)$$

และในทำนองเดียวกับสมการเขียนตามแนวแกน Y และ Z ได้

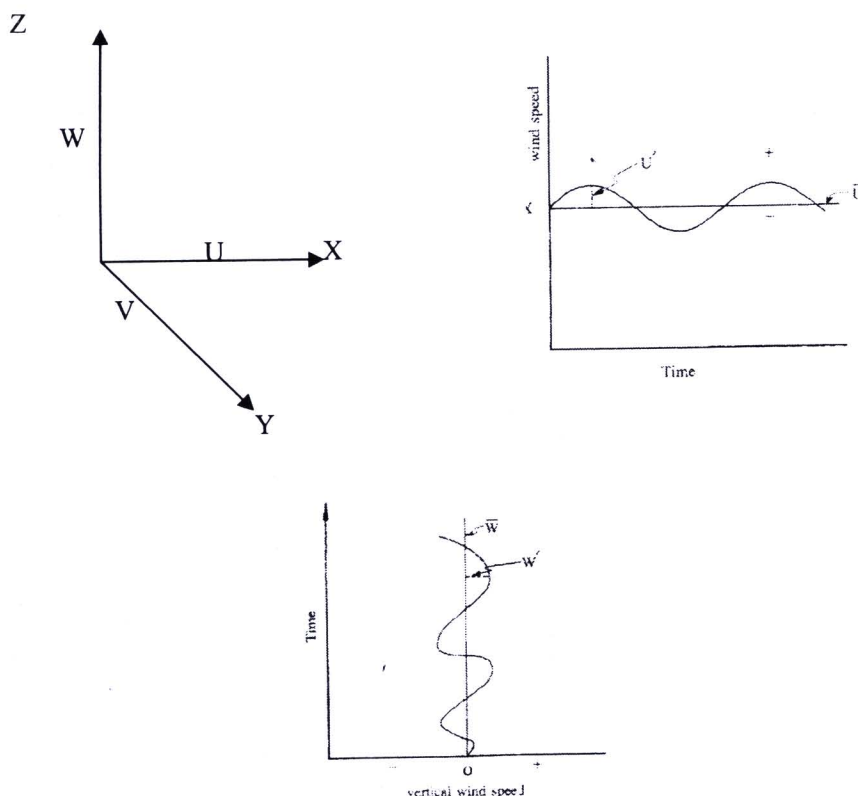
$$V = \bar{V} + v' \quad (2.15)$$

$$W = \bar{W} + w' \quad (2.16)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
วันที่ 3	ห้องสมุดเนวิจย
เลขทะเบียน	246675
เลขเรียกหนังสือ	

อาจกล่าวได้ว่า U คือ ลมประจำถิ่นที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะประจำ ส่วน u' นั้นคือ ความปั่นป่วนของลมที่เกิดขึ้นในเวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งต่างไปจาก u และ u' นี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้สภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงไป อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ อย่างไรก็ตามค่าของ V นั้น คล้ายๆ กับ U แต่ W นั้น จะแตกต่างกันไป เพราะในเวลานานๆ นั้น ค่าของ $W = 0$ หรือจะเปลี่ยนไปแล้วแต่เวลาที่จะคำนึงถึงลมที่วัดอยู่ทั่วไปนั้น คือ ลมแกนนอน ตามแกน X และ Y ซึ่งความจริงแล้ว ความเร็วลมทั้งสองแกนนี้ไม่สามารถแบ่งหรือกำหนดได้ว่าเป็นแนวอะไร

การวัดลม จึงมักพบว่า ความเร็วลมตามแนวนอนเป็นที่ทราบในกลุ่มนักอุตุนิยมวิทยาว่า ความเร็วลมตามแนวแกนนอนมีบทบาทต่อการเคลื่อนย้าย ทั้ง ความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมอย่างมาก โดยเฉพาะเรื่องของ Advection อีกนัยหนึ่งก็เป็นตัวการที่จะนำสิ่งทั้งสามนี้จากที่กำหนดให้ด้านแนวตั้ง หรือ W' นั้น ถึงแม้ว่ามีความสำคัญในวงแคบ แต่ปัจจุบันนี้มีบทบาทอย่างมาก เพราะเป็นตัวการที่จะเคลื่อนย้ายสิ่งต่างๆ จากผิวโลกสู่บรรยากาศ และจากบรรยากาศสู่ผิวโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วสภาวะอากาศที่ใกล้ Neutral นั้นในเขตของ Laminar Boundary แล้ว Molecular Transport ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายโดยการแพร่ แทนที่จะเป็นลักษณะของ Turbulent Transport ลมทางแนวตั้งจะเป็นตัวช่วยได้อย่างดี



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมทั้งแนวตั้งและแนวนอน (3 Dimensions) [12]

2.8 ฟลักซ์ของการตกสะสมของกรด

ฟลักซ์ของการตกสะสมของกรด คือ จำนวนของสารมลพิษที่เคลื่อนที่ตกลงมาบนพื้นที่แหล่งรองรับต่อหน่วยเวลา โดยพิจารณาจากการตกสะสมของอนุภาค ไอหรือก๊าซ โดยค่าอัตราการตกสะสมแห้ง (Dry Deposition Rate) จะหมายถึง ค่าฟลักซ์ของการตกสะสมแห้ง (Dry Deposition Flux: F_d) หรือความเร็วของการตกสะสมแห้ง (V_d) ดังสมการ

$$V_d = - F/C_{avg}$$

(2.17)

โดยค่า C_z คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษ (kg/m^3) ณ จุดอ้างอิงที่ความสูง z เมตร โดยเครื่องหมายลบหมายถึง ค่าความเร็วที่ตกสะสมลงสู่ผิวรับมีค่าเป็นบวก การประมาณค่าฟลักซ์ จากการสะสมของสารประกอบไนเตรต และซัลเฟต สามารถหาได้โดยตรง คือ การวิเคราะห์จากสารเคมีที่ตกสะสมอยู่บริเวณผิวใบไม้ หรือพื้นผิวของแหล่งรองรับการตกสะสม และโดยทางอ้อมคือ วัดจากค่าฟลักซ์ของการตกสะสมแห้ง จากความเข้มข้นของมลพิษที่ตกสะสมจากชั้นบรรยากาศ และประมาณค่าความเร็วการตกสะสม โดยใช้ High-Volume Sampler ร่วมกับค่าทางอุตุนิยมวิทยาที่ตรวจวัดได้ อย่างไรก็ตามการคำนวณหาฟลักซ์การตกสะสมของสารกรดควรพิจารณาปัจจัยต่างต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทางด้านอุตุนิยมวิทยา คุณสมบัติของมลพิษ และตัวแปรพื้นผิวด้วย ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลการตกสะสมและการกำจัดของสารกรด [13]

ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา	สมบัติของมลพิษ		ตัวแปรพื้นผิว
	อนุภาค	ก๊าซ	
ความเร็วลม	ขนาดอนุภาค	ปฏิกิริยาของสารเคมี	อากาศพลศาสตร์
ความเร็วเสียดทาน	รูปร่าง	การแพร่ของโมเลกุล	ความเปียกชื้น
ความเสถียรของ บรรยากาศ	ความหนาแน่น	ความดันย่อย	ความสูงของเรือนยอด
ความปั่นป่วน	สัมประสิทธิ์การแพร่	ความสามารถในการ ละลายน้ำ	โครงสร้างเรือนยอด
อุณหภูมิ	ความสามารถของ อนุภาคในการดูด ความชื้น		การดูดซึมของพื้นผิว

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ปัจจัยที่มีอิทธิพลการตกสะสมและการกำจัดของสารกรด [13]

ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา	สมบัติของมลพิษ		ตัวแปรพื้นผิว
	อนุภาค	ก๊าซ	
ความชื้นสัมพัทธ์	ความสามารถในการ ละลายน้ำ		ความพรุน
ฟลักซ์ความร้อน พื้นผิว	ไฟฟ้าสถิต การชน การสกัดกั้น		คุณสมบัติทางไฟฟ้า ลักษณะทางภูมิศาสตร์

2.9 เทคนิคการศึกษาการตกสะสมของสารกรดในบรรยากาศ

2.9.1 Surrogate Surfaces

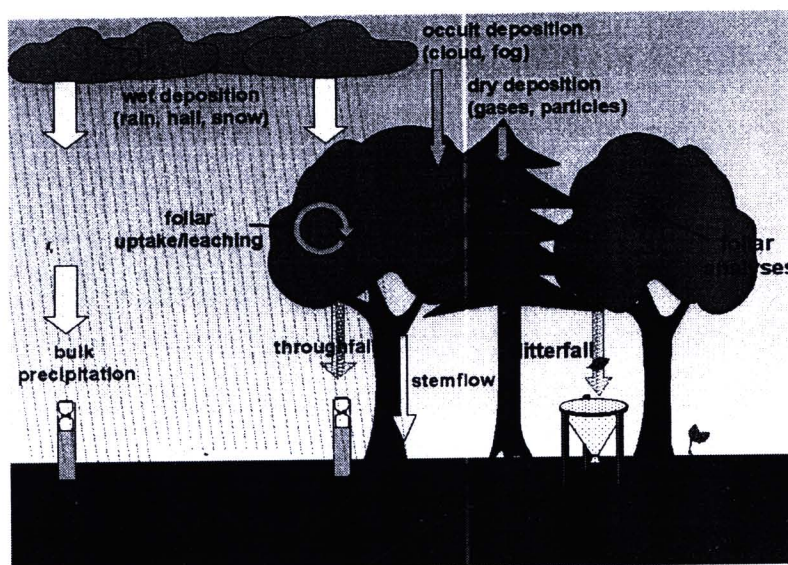
การศึกษาการตกสะสมของสารมลพิษด้วยวิธีการเซอร์โรเกท เป็นวิธีการรองรับสารมลพิษด้วยแผ่นกรอง ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมกับกระบวนการต้านทานพลศาสตร์ (Aerodynamic Resistance, r_a) ในขณะที่ความต้านทานชั้นแบบกึ่งผิวราบ (Quasi Laminar Layer, r_b) และความต้านทานทรงพุ่ม (Canopy Resistance, r_c) ยังมีอิทธิพลต่อการตกสะสมด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการเซอร์โรเกทยังเป็นวิธีการที่ไม่ใช่พฤติกรรมตามธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในบรรยากาศ ซึ่งวิธีการนี้จะอาศัยการเก็บสารมลพิษในรูปอนุภาคมลสาร (Particulate) ในบรรยากาศมากกว่าการเก็บตัวอย่างสารมลพิษในรูปของก๊าซ สำหรับการออกแบบเซอร์โรเกท จะใช้หลักการทางพลศาสตร์ในการออกแบบแพนอากาศ (Airfoil) เพื่อให้ใช้ได้ดีกับการเก็บอนุภาคขนาดใหญ่ได้ [10]

2.9.2 การเก็บตัวอย่างบนพื้นผิวธรรมชาติ (Natural Surfaces)

การเก็บตัวอย่างบนพื้นผิวธรรมชาติ จะเป็นตัวแทนค่าการตกสะสม และการปนเปื้อนของสารมลพิษในบรรยากาศ เมื่อไม่สามารถใช้วิธีการทางอุตุนิยมวิทยาได้ในการศึกษาของความสัมพันธ์เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีความซับซ้อนของสภาพภูมิประเทศ หรือเป็นบริเวณพื้นที่ป่าไม้ที่อยู่ไกลออกไปจนไม่สามารถใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดต่างๆ ที่ต้องใช้ไฟฟ้าในการตรวจวัดได้ ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างบนพื้นผิวธรรมชาติประกอบด้วย [10]

- 1) การเก็บน้ำพืชหยด หมายถึง กระบวนการที่น้ำฝนสามารถผ่านชั้นเรือนยอดของต้นไม้ลงสู่ดิน โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำฝนประกอบด้วยกรวยปากกว้าง สายยาง และถังเก็บน้ำฝน

- 2) การเก็บน้ำฝนผ่านกระบวนการน้ำไหลตามต้นไม้ หมายถึง กระบวนการของน้ำฝนที่ไหลลงมาตามลำต้นและสามารถลงสู่พื้นดินที่บริเวณโคนต้น ประกอบด้วยท่ออย่างพันรอบต้นไม้เพื่อรองรับน้ำฝนไหลลงสู่ถังเก็บน้ำฝน
- 3) เก็บการร่วงหล่นของใบไม้หรือใบไม้สดและส่วนอื่นๆ ของพันธุ์ไม้ลงสู่ดิน
- 4) การวิเคราะห์ใบพืชสด



รูปที่ 2.4 การเก็บตัวอย่างบนพื้นผิวธรรมชาติ [14]

2.9.3 การวิเคราะห์ในห้องเก็บตัวอย่าง (Chamber Method)

วิธีการนี้จะเก็บตัวอย่างสารมลพิษประเภทก๊าซ ในห้องเก็บตัวอย่างที่อาศัยการควบคุมปิด และเปิดตามเวลาที่กำหนด โดยวิธีการนี้จะศึกษาการตกสะสมของสารมลพิษบนพื้นผิวดินหรือพืช ซึ่งสามารถคำนวณ ฟลักซ์เข้า และออกในห้องเก็บตัวอย่างตามช่วงระยะเวลาที่ศึกษาได้

2.9.4 วิธีสหสัมพันธ์เอ็ดดี้ (Eddy Correlation/Covariance)

วิธีสหสัมพันธ์เอ็ดดี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในทางการศึกษาทางจุลอุตุนิยมวิทยา (Micrometeorological) โดยใช้วิธีการทางสถิติสหสัมพันธ์ในการคำนวณการเปลี่ยนของความเร็วลมในแนวดิ่ง (W-Component) และความเข้มข้นของสารมลพิษ (C) ค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จาก [20, 23]

$$F = \overline{W' C'} \quad (2.18)$$

ในกรณีที่สารมลพิษเป็นอนุภาค (Aerosol) ค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จาก

$$F(d_p) = \overline{w \cdot c}(d_p) \quad (2.19)$$

โดย d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค สามารถหาค่าการกระจายของขนาดอนุภาค (Size Distribution) ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของอนุภาคจะเก็บทุกๆ 30 นาที และสามารถหาค่าความเร็วการตกสะสมได้จาก

$$V_d = -\overline{w} \left(\frac{C'}{C} \right) \quad (2.20)$$

2.9.5 การสะสมแบบเอ็ดดี้ (Eddy Accumulation)

วิธีการสะสมแบบเอ็ดดี้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์การเก็บตัวอย่าง เช่น Annular Denuder หรือ Filter Pack ที่ไม่สามารถเก็บในเวลาจริงแบบต่อเนื่อง (Real Time) ได้ โดยเป็นการเก็บตัวอย่างที่สะสมในเวลาที่กำหนด ซึ่งอาศัยการเก็บตัวอย่างที่ระดับความสูงเดียวกันแต่แบ่งการเก็บเป็นช่วงลมขึ้น และลง ค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นที่แตกต่างกันโดยอ้างอิงจากความเร็วลมในแนวดิ่ง (w)

$$F = b \sigma_w (C_{up} - C_{down}) \quad (2.21)$$

เมื่อ b คือ สัมประสิทธิ์การทดลอง (Experimental Coefficient) คำนวณได้จากการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) ของความเร็วลมในแนวดิ่ง σ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วลมในแนวดิ่ง และ C_{up} และ C_{down} คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารมลพิษ เมื่อ ความเร็วลมในแนวดิ่งจะเป็นค่าบวก และค่าลบ

2.9.6 Gradient Method

วิธีการเกรเดียนต์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาฟลักซ์ของมลพิษบรรยากาศ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการใช้ค่าความเข้มข้นของมลพิษที่ระดับความสูงที่ต่างกัน โดยมีสมมติฐานที่ว่าสารมลพิษมีการแพร่กระจายแบบเอ็ดดี้ (Eddy Diffusion) ซึ่งเป็นการแพร่กระจายของสารมลพิษในแนวดิ่ง โดยมีระดับความสูงไม่กี่เมตรจากพื้นผิวที่ศึกษา ค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จากกฎของฟิคส์ (Fick's Law) ดังสมการ 2.22

$$F = -K_z \frac{dc}{dz} \quad (2.22)$$

เมื่อ dc คือ ความแตกต่างความเข้มข้นของของมลพิษที่ในแนวดิ่ง และ dz หมายถึง ความสูงของตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง ในขณะที่ K_z หมายถึง สัมประสิทธิ์การขนส่ง หรือ การแพร่แบบเอ็ดดี้ของสารมลพิษ

$$F = -u^* c^* \quad (2.23)$$

ซึ่ง u^* คือ ความเร็วเสียดทาน และ c^* คือ ความเข้มข้นแบบเอ็ดดี้ และ

$$c^* = \frac{k\Delta c}{[\ln((z_2 - d)/(z_1 - d)) - \Psi_h((z_2 - d)/L) + \Psi_h((z_1 - d)/L)]} \quad (2.24)$$

ซึ่ง Δc เป็นค่าผลต่างของความเข้มข้นที่ความสูงระหว่าง z_2 และ z_1 , k คือ ค่าคงที่ Von Karman, L คือ ค่าความยาว Monin Obukhov, Ψ_h เป็นฟังก์ชันซึ่งได้ปรับค่าความเสถียรของการอินทิเกรตค่าความร้อน และ d คือ Zero Plane Displacement Height โดยทั่วไปค่า $d/h = 0.6$ สำหรับสิ่งปกคลุมในฤดูร้อน ที่ซึ่งค่า h เป็นความสูงของสิ่งปกคลุม

2.9.7 วิธีการอนุมาน (Inference Method)

วิธีการอนุมานจะใช้ในการหาอัตราการตกสะสมของสารมลพิษ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่วัดได้จากความสูงอ้างอิงจะนำมาคูณด้วยความเร็วการตกสะสม (V_d) วิธีการนี้จะใช้ได้ และสะดวกเมื่อเป็นการตรวจติดตามอย่างต่อเนื่องในพื้นที่นั้นๆ ดังสมการ (2.25) การนำข้อมูลต่างๆ ทางด้านอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลเรือนยอดพืช เช่น ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (Leaf Area Index, LAI) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วการตกสะสมได้

$$F = -V_d \times C \quad (2.25)$$

2.9.8 วิธีอัตราส่วนโบเวน (Bowen Ratio Method)

อัตราส่วนโบเวนเป็นวิธีการวัดค่าฟลักซ์ทางอ้อม ได้จากการทำสมดุลพลังงานภายใต้พื้นผิวของการตกสะสม

$$R_n - G = C + \lambda E \quad (2.26)$$

$$\text{หรือ } \lambda_E = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (2.27)$$

ซึ่ง β คือ ค่าอัตราส่วนโบเวน (C/λ_E) ค่าการแผ่รังสีสุทธิ (R_n) และค่าฟลักซ์ความร้อนของดิน (G) เป็นค่าที่วัดได้โดยตรง ค่า β ได้จากการวัดอุณหภูมิ และความดันไอที่ระยะความสูงระดับต่างๆ ภายได้ชั้น ฟลักซ์คงที่ ถ้าสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และความดันไอน้ำเท่ากัน สมการข้างต้นจะเป็น

$$\beta = \frac{C}{\lambda_E} = \frac{\gamma \partial T}{\partial e} \quad (2.28)$$

และ $\partial T / \partial e$ เป็นเส้นความชันที่ได้จากการลงจุดระหว่างอุณหภูมิที่แต่ละความสูงกับความดันไอน้ำที่ความสูงเดียวกัน วิธีอัตราส่วนโบเวนสามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการสมดุลความร้อน ดังนี้

$$\begin{aligned} R_n - G &= -D\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - D\rho c_p \left(\frac{\partial e}{\gamma \partial z} \right) \\ &= D\rho c_p \left(\frac{\partial T_e}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

ซึ่ง D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทแบบปั่นป่วน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนและไอน้ำ และ T_e คือ อุณหภูมิสมมูลย์ของ $T + (e/\gamma)$ ถ้าให้ค่าฟลักซ์ของความร้อนสัมผัส

$$C = -D\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.30)$$

และใช้รูปแบบสมการที่คล้ายคลึงกันโดยมีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ของความร้อนแฝง λ_E ถึง $\gamma^{-1}(\partial e / \partial z)$ และค่าฟลักซ์ F ของก๊าซใดๆ ถึง $\partial S / \partial z$ เมื่อรวมสมการเหล่านี้เข้าด้วยกันจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$C = (R_n - G) \left(\frac{\partial T}{\partial T_e} \right) \quad (2.31)$$

$$\lambda_E = \frac{(R_n - G)}{\gamma} \left(\frac{\partial e}{\partial T_e} \right) \quad (2.32)$$

$$F = \frac{(R_n - G)}{\rho c_p} \left(\frac{\partial S}{\partial T_e} \right) \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \Delta \left(T + \frac{e}{\gamma} \right) = \Delta T + \Delta \left[\frac{e}{(c_p / \lambda E)} \right] \\ &= \Delta T + \Delta \left[\frac{\lambda E e}{c_p P} \right] = \Delta T + \Delta e (\lambda E / c_p P) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{(R_n G)(C_{s1} - C_{s2})}{\rho_a c_p [\Delta T + \Delta e (\lambda E / c_p P)]} \\ F &= \frac{(R_n G)(C_{s1} - C_{s2})}{\rho_a c_p \Delta T + \Delta e (\lambda E / c_p P) C_p \rho_a} \\ F &= \frac{(R_n G)(C_{s1} - C_{s2})}{\rho_a c_p (0.622 / P)(e_1 - e_2) + \rho_a c_p (T_1 - T_2)} \end{aligned} \quad (2.35)$$

จากสมการ $F = D_{1-2}(C_{s1} - C_{s2})$ ดังนั้น

$$D_{1-2} = \frac{(R_n - G)}{\rho_a \lambda (0.622 / P)(e_1 - e_2) + \rho_a c_p (T_1 - T_2)} \quad (2.36)$$

$$\text{หรือ} \quad D_{1-2} = \frac{(R_n - G)}{\rho_a \lambda \Delta e (0.622 / P) + \rho_a c_p \Delta T} \quad (2.37)$$

ซึ่ง λ คือ ค่าความร้อนแฝง E คือ อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำกับอากาศ = 0.622 P คือ ความดันรวม และ C_{s1} และ C_{s2} คือความเข้มข้นของก๊าซที่ระดับความสูง z_1 และ z_2 ตามลำดับ โดยทั่วไปการคำนวณค่าฟลักซ์ด้วยวิธีเอโรไดนามิก และวิธีอัตราส่วนโบเวนจะใช้ค่าเฉลี่ยทุกๆ ครึ่งชั่วโมงถึงหนึ่งชั่วโมง เพื่อดูศักยภาพ ซึ่งค่าที่ได้อาจขึ้นๆ ลงๆ โดยเฉพาะช่วงเวลาของวันที่มีเมฆปกคลุม และถ้าเกิดในช่วงสั้นๆ ก็จะไม่นำมาคิดรวมในการประมาณค่าฟลักซ์เฉลี่ย ในทำนองเดียวกันค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวันที่ทำให้การหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาใกล้เคียงอาทิตย์ขึ้นและและดวงอาทิตย์ตกไม่สามารถนำมาคิดรวมได้

เมื่อทราบค่าฟลักซ์แล้ว เราสามารถคำนวณอัตราความเร็วของการตกสะสม V_d ได้ด้วยสมการ 2.38

$$v_d = \frac{F}{C_{ave}} \quad (2.38)$$

ซึ่งค่า C_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของมลพิษ

2.9.9 โมเดลความต้านทาน (Resistance Model)

โมเดลความต้านทาน ใช้ในการคำนวณกระบวนการขนถ่ายมวลอากาศบนพื้นผิวที่มีความแตกต่างกัน และถูกแยกด้วยกระบวนการไหลของอากาศ ซึ่งถูกกำหนดให้ค่าความต้านทานต่างๆ ที่ใช้ในการหาความเร็วการตกสะสม ดังนี้ [15]

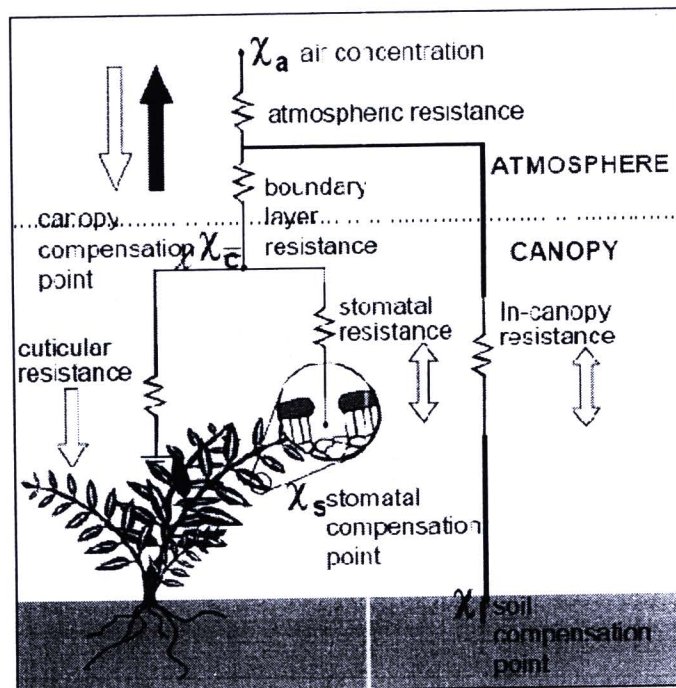
$$V_d = r_t = \frac{1}{r_a + r_b + r_c} \quad (2.39)$$

r_a = ความต้านทานของพลวัตทางอากาศ (Aerodynamic Resistance)

r_b = ความต้านทานของชั้นกึ่งผิวราบ (Quasi Laminar Resistance)

r_c = ความต้านทานของพื้นผิว หรือ สิ่งปกคลุมผิว (Surface หรือ Canopy Resistance)

r_t = ความต้านทานรวม



รูปที่ 2.5 แบบจำลองความต้านทาน (Resistance Model) [15]

กรณีการศึกษาการตกสะสมของอนุภาค จะอาศัยกระบวนการการตกตะกอน และแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตก (Settling Velocity) ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งยังมีอิทธิพลของการสะท้อนกลับ และการแขวนลอยที่มีเวลานานของอนุภาคในกลไกการสัมผัสกับพื้นผิว จึงสามารถหาความเร็วการตกสะสมได้จากสมการ 2.40

$$V_d = V_g + \frac{1}{r_a + r_b} \quad (2.40)$$

เมื่อ V_g คือความเร็วการตกตะกอน เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก r_s คือ ความต้านทานของพื้นผิว ซึ่ง V_g หาได้จากสมการสโตก (Stoke Equation)

$$V_g = (pd_p^2gc)/(18\eta) \quad (2.41)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอนุภาค d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค g คือความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วง η คือสัมประสิทธิ์ความหนืด C คือค่า Cunningham ซึ่งหาได้จากสมการ 2.42

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.2e - 0.55\frac{d_p}{\lambda}) \quad (2.42)$$

เมื่อ λ คือ ค่าเฉลี่ย Mean Molecular Free Path

ดังนั้นการหาค่า Aerodynamic Resistance สามารถหาได้จากสมการ 2.43

$$r_a = \frac{\ln(\frac{z_{ref}-d}{z_0}) - \Psi_H}{ku_*} \quad (2.43)$$

เมื่อ z_{ref} ความสูงอ้างอิง z_0 คือ ระยะทางพื้นผิว k คือ ค่าคงที่ Von Karman (ประมาณ 0.4) u_* คือ ความเร็วเสียดทาน Ψ_H คือ Intergrated Flux Profile Function for Heat ในขณะเดียวกันการคำนวณหาประสิทธิภาพการเกาะบนพื้นผิว สามารถหาได้โดยใช้การคำนวณความเร็วการตกสะสมบนพื้นผิว (Surface Deposition Velocity, V_{ds}) ได้จากสมการ 2.44

$$V_{ds} = \frac{1}{r_s} \quad (2.44)$$

ซึ่งจะมีลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างของพื้นผิว ในกรณีที่ไม่คำนึงกระบวนการตกตะกอนของอนุภาค การคำนวณหาความเร็วการตกสะสม สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.45

$$V_d = \frac{1}{r_a + r_s} \quad (2.45)$$

r_s คำนวณจากสมการ 2.46

$$r_s = r_b + r_c \quad (2.46)$$

r_b คำนวณได้จากสมการ 2.47

$$r_b = \frac{\ln\left(\frac{z_0 + z_{oc}}{z_0}\right)}{k_{u*}} \quad (2.47)$$

เมื่อ z_{oc} ความสูงของแหล่งกักเก็บอนุภาค โดยการคำนวณค่า r_b จำเป็นต้องศึกษาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (Leaf Area Index) ด้วยเนื่องจากมีอิทธิพลต่อการดักจับอนุภาคฝุ่น

2.10 ผลกระทบการตกสะสมของสารกรด

สารมลพิษในบรรยากาศจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยการเกิดปัญหาโดยตรง (มลพิษทางอากาศ) และเป็นปัญหาทางอ้อมโดยการตกตะกอนสะสมจากบรรยากาศผ่านกระบวนการทั้ง Wet Deposition และ Dry Deposition ฝนกรดสามารถทำลายองค์ประกอบต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมได้แก่ พืช สัตว์ ป่าไม้ ดิน และน้ำ ก่อให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุต่างๆ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และความเป็นอยู่ของมนุษย์

2.10.1 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสุขภาพของมนุษย์ เมื่อสัมผัสโดยตรงจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่ออวัยวะภายนอก เมื่อสูดดมเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ [31] ความรุนแรงต่อสุขภาพขึ้นอยู่กับความไวในการตอบสนองของแต่ละบุคคล (Sensitivity) และปริมาณความเข้มข้นต่อระยะเวลาที่ได้รับ [3, 17] ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ที่ระดับความเข้มข้น 0-0.6 ppm ไม่มีผลตอบสนองใดๆ จากร่างกาย ไม่ได้กลืน ไม่ระคายเคือง ที่ความเข้มข้น 0.15-0.25 ppm มีผลต่อการเกิดมะเร็งในระบบทางเดินหายใจ ถ้าได้รับติดต่อกันนาน 1-4 วัน ที่ความเข้มข้น 1.0-2.0

ppm ได้รับติดต่อกันแค่ 3-10 นาที ก็มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ที่ 1.0-5.0 ppm เริ่มได้กลิ่น และทำให้แน่นหน้าอก ที่ 5.0 ppm ทำให้หมดสติได้ และมีผลต่อปอด ที่ 10 ppm มีความรุนแรงขึ้นทำให้เป็นอันตรายต่อผู้ได้รับหรืออาจทำให้เลือดออกจุกได้ เมื่อได้รับติดต่อกันนาน 1 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นมากกว่า 20 ppm ทำให้เกิดการระคายเคืองตา หายใจไม่ออก อาเจียน และที่ความเข้มข้น 400-500 ppm ได้รับในเวลาสั้นๆ หรือระดับที่สามารถทนได้ไม่เกิน 15 นาที ถ้าได้รับแบบเฉียบพลัน สามารถทำให้เกิดอันตรายอย่างเฉียบพลันได้ จะก่อให้เกิดการอาเจียน เกิดโรกระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่อาการไอ เรื่อยๆ ไปจนถึงการทำลายปอดอย่างถาวร โดยที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ ปอดไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ เกิดการระคายเคืองหลอดลม ทำให้เกิดการปอดบวมหรือเกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

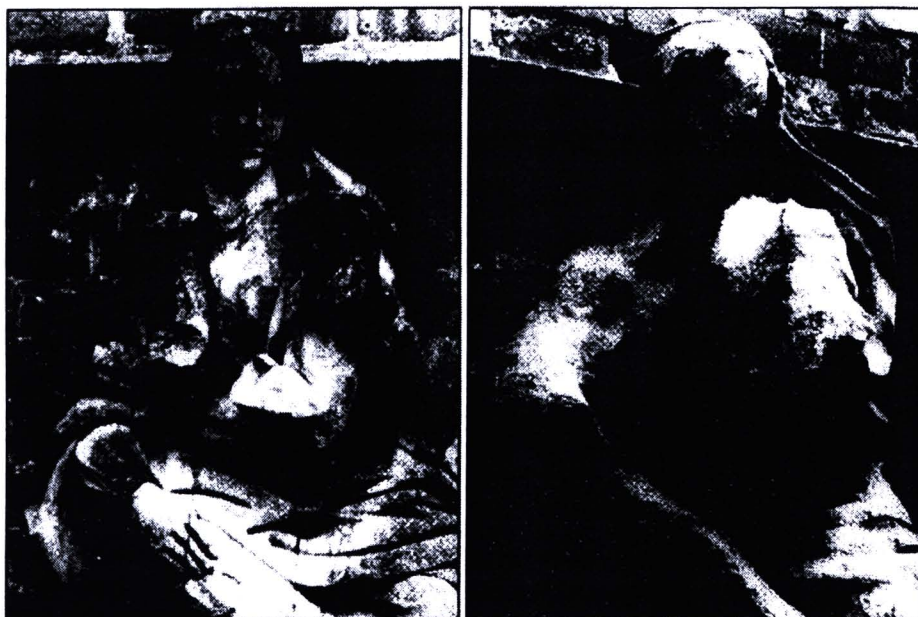
ตารางที่ 2.2 ความไวของดิน (Soil Sensitivity) ต่อฝนกรด [17]

ระดับความไวของดิน	CEC (meq/100g)	สภาพอื่นๆ ซึ่งมีผลเกี่ยวข้อง
ไม่ไว (Nonsensitive)	ไม่จำกัด	มีคาร์บอเนตอิสระหรือน้ำท่วมบ่อยครั้ง
	> 15.4	ไม่มีคาร์บอเนตอิสระ
ไวเล็กน้อย (Slightly Sensitive)	6.2 - 15.4	ไม่มีคาร์บอเนตอิสระ ไม่มีน้ำท่วมขังบ่อย
ไว (Sensitive)	< 6.2	ไม่มีคาร์บอเนตอิสระ ไม่มีน้ำท่วมบ่อย

2.10.2 ผลกระทบต่อวัสดุและสิ่งก่อสร้าง

ฝนกรดมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนวัสดุต่างๆ เสียหายได้เกิดจากความสกปรก การสึกกร่อน หรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้อาคารผุกร่อนได้ ได้แก่ ควัน ผุ่นละออง หรืออนุภาคที่เป็นกรด หรือค้างทำให้ข้าวของชำรุดเสียหายได้ ได้ เช่น สะพานเหล็ก สีทาบ้านยางรถยนต์ เป็นต้น อนุภาคผุ่นละอองแขวนลอยในบรรยากาศที่ตกกลับมาแรงดึงดูดของโลกแล้วเกาะติดกับวัตถุ และสิ่งก่อสร้างต่างๆ ทำให้สกปรกเลอะเทอะ นอกจากนี้อนุภาคผุ่นละอองแขวนลอยยังมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ไว้ที่พื้นผิวอนุภาค หรือจากชนิดของอนุภาคผุ่นละอองเองที่เป็นชนิดที่มีสภาพเป็นกรดหรือมีองค์ประกอบทางเคมีที่อันตราย เมื่อเกาะติดวัตถุหรือสิ่งก่อสร้างจึงสามารถทำอันตรายต่อสิ่งต่างๆ เหล่านี้ได้ เช่น ทำให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุที่ทำจากโลหะ การทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้างทำให้เกิดความเสียหายต่องานศิลปะ ก่อให้เกิดการสึกกร่อนของหลังคาสังกะสี เป็นต้น [3, 4, 17, 16]

ผลกระทบของมลพิษอากาศที่มีผลต่อสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ และวัฒนธรรม เป็นเรื่องที่อยู่ในความสนใจ และเป็นปัญหาในหลายประเทศ ซึ่งเมื่อสืบทอดแต่ปัญหามลพิษที่อยู่ในบรรยากาศทั่วไปมาจากหลายสาเหตุ และสะสมเป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น ฝนกรด และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการสึกกร่อน และไม่สามารถคืนสภาพดั้งเดิมได้ ตัวอย่างเช่น รูปปั้นปติมากรรมหินทรายในเยอรมัน สร้างเมื่อปี 1702 เป็นส่วนตกแต่งทางเข้าปราสาทที่เฮร์เทิน (Herter) ใกล้กับเรคคลิงฮูเซน (Recklinghausen) ประเทศเยอรมัน ภาพเปรียบเทียบผลกระทบจากการตกสะสมกรดนี้ เผยแพร่โดยช่างซ่อมบำรุงโบราณวัตถุ พิพิธภัณฑ์ในแคว้นเวสต์ฟาเลีย (Westfälisches Amt Fur Denkmalpflege) ในภาพซ้ายมือเมื่อปี ค.ศ. 1908 หลังจากสร้างมาแล้ว 206 ปี รูปปั้นมีสิ่งสกปรกฝังติดและมือซ้ายมือข้างขวาหายไป แต่ใบหน้า และมือขวายังอยู่ภาพด้านขวามือถ่ายเมื่อปี ค.ศ. 1969 ใบหน้า และมือขวาหายไปหมดแล้วซึ่งการสึกกร่อนนี้เกิดขึ้นในระยะเวลาเพียง 61 ปีหลังจากปี ค.ศ. 1908 ปัจจุบันรูปปั้นนี้ถูกเก็บไว้ในห้องปรับอากาศในพิพิธภัณฑ์ และใช้รูปปั้นจำลองไฟเบอร์กลาสวางไว้แทน



รูปที่ 2.6 เสียหายของรูปปั้นหินในประเทศเยอรมันที่เกิดจากการกัดเซาะของฝนกรด [18]

2.10.3 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตในน้ำ

เมื่อฝนกรดตกลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะทำให้ pH ของแหล่งน้ำนั้นลดลง น้ำมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น เมื่อค่า pH ของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป ผลกระทบที่ตามมา คือ ผลผลิตขั้นปฐมภูมิ (Primary Production) เปลี่ยนแปลง ลดการทำงานของจุลินทรีย์ และมีผลต่อเนื่องทำให้การย่อยสลายอินทรีย์สารลดน้อยลง สารอินทรีย์จะสะสมในระบบนิเวศน์ทำให้ขาดวัฏจักรการนำธาตุอาหารมาใช้

ประโยชน์ สัตว์น้ำขนาดเล็กที่อาศัยอยู่ตามท้องน้ำ (Benthic Invertebrates) จะลดลงและพบว่า สารโลหะหนัก เช่น นิเกิล ทองแดง เหล็ก อลูมิเนียมปรอท แมงกานีส ตกสะสมหรือบางครั้งทำให้น้ำมีโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฝนกรดทำลายล้างการจับยึดไอออนของโลหะหนักไว้ จึงมีผลต่อเนื่องถึงพืชตามธรรมชาติ และผลผลิตทางการเกษตร นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของปลาเป็นอย่างมาก ปลาบางชนิดจะมีความไวต่อค่า pH ต่ำ ปลาหลายชนิดจะหยุดขยายพันธุ์เมื่อค่า pH ต่ำกว่า 5.5 นอกจากนั้นปริมาณของแพลงตอนจะลดลงเมื่อค่า pH ของน้ำนั้นต่ำลง และจะมีผลต่อเนื่องถึงปลาและสัตว์น้ำต่างๆ เพราะแพลงตอนเป็นแหล่งอาหารสำคัญของปลาและสัตว์น้ำต่างๆ ซึ่งท้ายที่สุดแล้วย่อมส่งผลถึงห่วงโซ่อาหารที่จะถูกทำลายไปในที่สุด แต่โดยทั่วไปแล้วแหล่งน้ำจะมีคุณสมบัติในการปรับตัว (Buffer Capacity) เพื่อไม่ให้ค่า pH ของน้ำเป็นกรดมากขึ้นเมื่อได้รับน้ำฝนที่เป็นกรด แต่ถ้าในแหล่งน้ำนั้นมีพื้นดินด้านล่างเป็นชั้นดินบางหรือหรือชั้นหินใต้ดินเป็นหินแกรนิต จะทำให้ความสามารถในการปรับตัวลดลง [3]

2.10.4 ผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในดิน

จุลินทรีย์ในดินมีบทบาทสำคัญในธรรมชาติ โดยจะเกี่ยวข้องกับวัฏจักรของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ฝนกรดจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์หลายด้านซึ่งก็รวมถึงจุลินทรีย์ในดิน และจะทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลงอีกด้วย ผลของฝนกรด และความเป็นกรดในดิน มีผลต่อกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) โดยเกิดการลดลงของแอมโมเนียมตามความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น และขบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) จะตอบสนองเป็นอย่างมากต่อสภาพที่เป็นกรด มีไนเตรตเกิดขึ้นเล็กน้อยในดินที่เป็นกรดเปรียบเทียบกับดินที่เป็นกลาง นอกจากนี้แล้วความเป็นกรดในดินที่เกิดจากฝนกรด อาจทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ และขบวนการ Nitrogen Mineralization ลดลง ฝนกรดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ภายในดิน เช่น จำนวนของแบคทีเรียชนิด Heterotrophic Microorganism ในดินที่ได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในปริมาณ 1.0 ไมโครลิตรต่อลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีจำนวนลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเหนี่ยวนำให้ความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหาร และวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดินลดลง และส่งผลกระทบต่อเนื้อไปยังพืชที่เจริญโดยใช้สารอาหารเหล่านั้นในดิน

2.10.5 ผลกระทบต่อทัศนวิสัย

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในบรรยากาศจะไปลดความสามารถในการมองเห็น โดยเมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นหรือไอน้ำในอากาศ เกิดเป็นละอองกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่เจือจาง และกระจายตัวอยู่ในบรรยากาศ โดยเฉพาะถ้าเกิดขึ้นในสภาวะที่มีความชื้นในบรรยากาศประมาณ 5 % ในระดับความเข้มข้นประมาณ $285 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ของอากาศ จะทำให้เกิดกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือเกิดซัลเฟตอื่นๆ ซึ่งสามารถลดปริมาณแสง หรือกระจายแสงที่ส่องผ่านให้หักเห (Scatter Light)

ออกไปจึงทำให้ปริมาณแสงบริเวณที่มีมลพิษมีปริมาณแสงไม่เพียงพอ [3] ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการมองเห็นลดลง ซึ่งพบว่าละอองของซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นสารหลักในการทำให้เกิดการมองเห็นลดลง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านต่างๆ ได้แก่ การคมนาคม ทัศนียภาพไม่สวยงาม เป็นต้น

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Wyers and Duyzer [19] ใช้วิธีการหาค่าฟลักซ์ด้วยวิธี Eddy Correlation และคำนวณการตกสะสมแห่งด้วยวิธี Aerodynamic Gradient ในพื้นที่ป่าสน เปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยใช้ค่ากลาง (Median) ของความเร็วการตกสะสม และใช้ความเร็วเสียดทานเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณหาความเร็วการตกสะสม เป็นสมการเชิงเส้น $V_d(50) = 0.0444u^{1.47}$ $r^2 = 0.988$ มีผลให้ความเร็วการตกสะสมมีความสัมพันธ์กับความเร็วเสียดทาน จากผลการศึกษาพบว่า การคำนวณความเร็วการตกสะสมของไนเตรทมีค่าสูงกว่าค่าสูงสุด (Maximum) อาจเกิดจาก Artefacts ในกระบวนการเก็บตัวอย่างได้ หรืออาจเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากก๊าซเป็นอนุภาค โดยเฉพาะแอมโมเนีย กรดไนตริก และแอมโมเนียม ไนเตรท บริเวณใกล้เรือนยอดพืชจะเกิดกระบวนการระเหยเมื่ออุณหภูมิบริเวณเรือนยอดเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการคำนวณความเร็วการตกสะสมของซัลเฟตด้วยวิธี Gradient Method ได้ค่าไม่เกินค่าความเร็วการตกสะสมสูงสุดที่ได้จากการวัดจริง

เทคนิค Eddy Covariance เป็นวิธีการทางสถิติ ที่ใช้วัดทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณสองตัว โดยดูว่าค่าเฉลี่ยของผลคูณระหว่างตัวแปร X ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ากลาง กับตัวแปร Y ที่เบี่ยงเบนออกจากค่ากลางว่ามีทิศทางสอดคล้องกันหรือไม่ ซึ่งการศึกษาฟลักซ์ด้วยเทคนิค Eddy Covariance คือ $F = w \cdot c$. Anna et al. [20] ได้ศึกษาความเร็วการตกสะสมของอนุภาคด้วยเทคนิค Eddy Covariance ใทวีปแอนตาร์กติกาซึ่งปกคลุมด้วยหิมะ โดยศึกษา 2 พื้นที่ ได้แก่ Lilla Vardet เป็นบริเวณที่มีพื้นผิวน้ำเรียบและ Aerosol Hill เป็นพื้นที่ที่เป็นภูเขาปกคลุมด้วยหิมะ จากผลการศึกษาสามารถตรวจวัดขนาดอนุภาคได้ระดับนาโนเมตร ดังนั้นกลไกในการเคลื่อนที่จึงเป็นแบบบราวน์เนียน ในการคำนวณค่าเฉลี่ยควรคำนึงถึงการเลือกวิธีในการหาค่าเฉลี่ย โดยศึกษาการแจกแจงอนุภาคควรได้ผลเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หากผลการแจกแจงอนุภาคไม่เป็นแบบการแจกแจงแบบปกติ ควรเลือกการหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Geometric Mean เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ค่ากลางของข้อมูลในการหาค่าเฉลี่ย จากผลการศึกษาการใช้ค่ากลางของความเร็วการตกสะสมจะมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าเฉลี่ยความเร็วการตกสะสมมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางอุณหภูมิมหาสมุทร เป็นข้อมูลที่สำคัญในการแปลผลข้อมูลของการเคลื่อนย้ายอนุภาคในบรรยากาศ โดยอิทธิพลของมุมของดวงอาทิตย์ มีผลทำให้เกิดความแปรปรวนของสถานะเสถียรของบรรยากาศ อุณหภูมิและความเข้มข้นฟลักซ์อนุภาค

Matsuda K., et. al., 2006 [21] ได้ทำการศึกษาการตกสะสมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบริเวณเหนือป่าสภาพอากาศทุ่งหญ้าเขตร้อนของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการศึกษาบริเวณป่าพลัดใบอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในภาคเหนือของประเทศไทย ด้วยวิธี Aerodynamic Gradient ในช่วงระหว่างเดือนมกราคม ถึงสิงหาคมในปี ค.ศ. 2004 ซึ่งครอบคลุมในช่วงฤดูร้อน (มกราคม ถึง เมษายน) และฤดูฝน (พฤษภาคม ถึง สิงหาคม) จากการวิจัยพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซจะเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อน และลดลงในช่วงฤดูฝน โดยค่า V_d ของ SO_2 มีค่า 0.10-0.31 cm/s ในช่วงกลางวัน และ 0.08-0.11 cm/s ในช่วงกลางคืนในฤดูร้อน ส่วนฤดูฝนมีค่าความเร็วในการตกสะสมทั้งกลางวันและกลางคืนอยู่ในช่วง 0.95-1.39 cm/s และ 0.26-0.42 cm/s ตามลำดับ ค่าความเร็วในการตกสะสมของก๊าซ SO_2 ในช่วงฤดูฝนจะสูงกว่าช่วงฤดูร้อน

Jitto et.al. [11]. ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเป็นการทดลองตรวจวัดค่าฟลักซ์ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหนือแปลงนาข้าว ณ ตำบลบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้ทำการศึกษาไว้ว่า ในเวลากลางวันปริมาณการตกสะสมจะสูงสุดโดยเฉพาะในช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน เนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลจากบรรยากาศสู่พื้นผิวได้มากตามอุณหภูมิที่สูงสุดในช่วงเวลาดังกล่าวและตามสมดุลพลังงาน ในช่วงกลางคืนค่าฟลักซ์จะเกือบเป็นศูนย์หรือบางครั้งติดลบเนื่องจากพื้นผิวดิน (ซึ่งมีค่าความจุความร้อนสูงกว่าอากาศมาก) จะยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศเหนือขึ้นไป ส่งผลให้ก๊าซ SO_2 เกิดการลอยตัวกลับสู่บรรยากาศ ผลการศึกษายังพบว่า ค่าฟลักซ์เฉลี่ยในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาวเท่ากับ 0.56, 0.11 และ 0.95 $mg/m^2/h$ ตามลำดับ โดยที่ก๊าซ SO_2 มีการตกสะสมสูงสุดในฤดูหนาว ส่วนฤดูฝนมีค่าต่ำสุดเนื่องจากก๊าซ SO_2 บางส่วนได้ถูกฝนชะล้างออกไป มีผลให้ความเข้มข้นของ SO_2 ในบรรยากาศเจือจางลง ความแปรปรวนของค่าฟลักซ์ของ SO_2 กับเวลาและฤดูกาลที่วัดได้ ส่วนผลการคำนวณค่า v_d ซึ่งเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนตามช่วงเวลาของวันและตามฤดูกาลเช่นเดียวกับค่าฟลักซ์ โดยมีความเร็วการตกสะสมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีเท่ากับ 1.25, 0.67 และ 1.51 cm/s สำหรับฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ตามลำดับ อัตราความเร็วนี้ใช้ได้จำเพาะกับท้องที่ที่มีสภาพภูมิอากาศใกล้เคียงกับประเทศไทย เนื่องจากค่านี้จะขึ้นกับสภาพทางภูมิศาสตร์และสภาวะอากาศส่วนท้องถิ่น

ในปี ค.ศ. 2008 แสงเดือน ตระกูลสำราญ [4] การศึกษาระยะต้นของความเร็วการตกสะสมแบบแห้ง (V_d) ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เหนือพื้นผิวกคลุมบริเวณนาข้าวโดยใช้วิธีอัตราส่วนของ Bowen และ Fick's Law อิทธิพลของพื้นผิวกคลุมหรือช่วงเวลากการเติบโตของข้าวต่อ V_d ของก๊าซ SO_2 ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งลักษณะ ปกคลุม หรือ Canopy ได้เป็น 3 ลักษณะได้แก่ Bare Soil, Half Full Growth และ Full Growth of Rice ค่า V_d เฉลี่ยที่พบมีค่า 0.28 cm/s ในเดือนกันยายน ซึ่งเป็นช่วงระยะ Bare soil ค่า V_d เฉลี่ยในเดือนกรกฎาคม และพฤศจิกายนมีค่าเท่ากับ 0.345 และ 0.52 cm/s ซึ่งอยู่ในช่วงระยะ Half Full Growth ตามลำดับ และค่า V_d เฉลี่ยในเดือนสิงหาคม และธันวาคมมีค่า 0.48

และ 0.848 cm/s ซึ่งอยู่ในช่วงระยะ Full Growth ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าลักษณะของพื้นที่ผิวปกคลุมส่งผลโดยตรงต่อค่า V_d ของก๊าซ SO_2 ซึ่ง V_d จะมีค่าสูงเมื่อพื้นดินถูกปกคลุมช่วงการเจริญเติบโตเต็มที่ของต้นข้าว และมีค่าต่ำในช่วงการเริ่มเพาะปลูกใหม่อีกครั้ง

Pio and Feliciano, 1996 [22] การศึกษาการตกสะสมแบบแห้งของก๊าซ SO_2 และ O_3 เป็นระยะเวลา 1 ปี บริเวณทุ่งหญ้าฝั่งตะวันตกของโปรตุเกส โดยใช้ระบบอัตโนมัติเก็บข้อมูลโดยใช้หลักการจุลอุตุนิยมวิทยาบริเวณผิวดินในการเก็บข้อมูลของก๊าซทั้ง 2 ตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งผลจะเก็บประจำวันและฤดูกาลในการตกสะสมแบบแห้ง และความต้านทานพื้นผิว ก๊าซ SO_2 และ O_3 จะมีค่าความต้านทานของสิ่งปกคลุม (Canopy Resistance) จะมีค่ามากที่สุดในฤดูร้อน ส่วนค่าต่ำสุดจะเกิดในช่วงฤดูใบไม้ผลิและฤดูหนาว ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะแตกต่างกันตรงที่สภาพพื้นผิว ในโปรตุเกสพืชจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดใฤดูใบไม้ผลิและในบางส่วนเริ่มแห้งในฤดูร้อนหลังจากที่ไม่มีฝนตกเป็นเวลานาน การปล่อยมลพิษจากท่อไอเสียจะมีผลอย่างมากต่อการตกสะสมแบบแห้ง สำหรับ SO_2 ค่าความต้านทานของสิ่งปกคลุม จะมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการประเมินนอกเหนือจากพื้นที่ผิวปากใบของพืช เช่น ความชื้นจะส่งผลต่อการคำนวณจึงยากที่จะทำการประเมินค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

จากผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ลักษณะภูมิประเทศและปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความเร็วลม ฤดูกาล ชนิดของพืช ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศ มีผลต่อการตกสะสมแบบแห้ง และจะพบว่า ค่าความเร็วในการตกสะสมแบบแห้งจะมีค่าสูงในฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน ตามลำดับ จะมีค่าการตกสะสมสูงที่สุดในช่วงกลางวันในช่วงเวลาประมาณ 12.00-14.00 น. และค่าต่ำสุดจะอยู่ในช่วงกลางคืน