

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอ(Passive Gas Sampler)

แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอเป็นอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างก๊าซแบบแพลสซีฟที่ถูกคิดค้นขึ้นและจดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1927 โดย Gordon และ Lowe ในการติดตามตรวจสอบก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์โดยใช้หลอดแก้วบรรจุสารละลายเกลือและpalladium chloride และใช้การเปลี่ยนของสีเป็นตัวบอกปริมาณของคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นผู้นำของอุปกรณ์กึ่งวัดปริมาณ (semi-quantitative device)ของแพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอในปัจจุบันนี้ จากแนวความคิดของ Gordon และ Lowe ได้ขยายผลในปีค.ศ.1968 โดย Plantzและคณะเพื่อการพัฒนาแพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอในการติดตามตรวจสอบในบุคคลในการตรวจวัดhydrazine, unsymmetrical dimethylhydrazineและmonomethylhydrazine โดยการทำปฏิกิริยาสารประกอบเหล่านี้กับสารประกอบที่ทำให้เกิดสี(bidone)จนเกิดสีม่วง โดยสีที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการตรวจวัดและความเข้มข้นของสารในการตรวจวัด

อย่างไรก็ตามหลังจากมีการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวัดแพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอในรูปแบบของอุปกรณ์การตรวจวัดกึ่งปริมาณ ในลำดับต่อมาก็ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอในรูปแบบของอุปกรณ์การตรวจวัดปริมาณ (Quantitative device) โดยใช้ทฤษฎีการแพร่(diffusion)และทฤษฎีการซึมผ่าน(permeation)ชั้นอากาศที่หยุดนิ่ง งานวิจัยแรกที่ถูกตีพิมพ์จัดทำโดย Palm และGonnison ในปีค.ศ.1973 ได้ทำการคิดค้นอุปกรณ์แรกที่ใช้หลักการการแพร่ของก๊าซเพื่อวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศและจากงานวิจัยฉบับนี้ก็ได้ถูกขยายผลในปี ค.ศ.1976ในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบุคคล

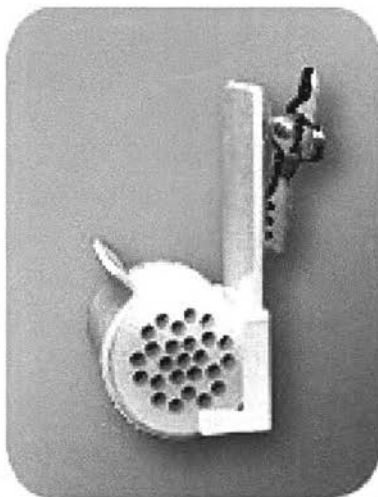
จะเห็นว่าแพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอมีการพัฒนาในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมาทำให้แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอถูกพัฒนาไปในหลายรูปแบบในหลายบริษัทมุ่งเน้นการผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสุขภาพ ทำให้แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอเพื่อใช้ในการตรวจวัดการได้รับสัมผัสของบุคคลและสิ่งแวดล้อม เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องปั๊มในการเก็บตัวอย่าง ไม่ต้องใช้ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ สามารถใช้งานได้ตลอด 24 ชั่วโมง ปราศจากเสียงและมีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ประเภทอื่นๆและยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้แพลสซีฟก๊าซแซมเปิลอเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน



ก



ข



ค



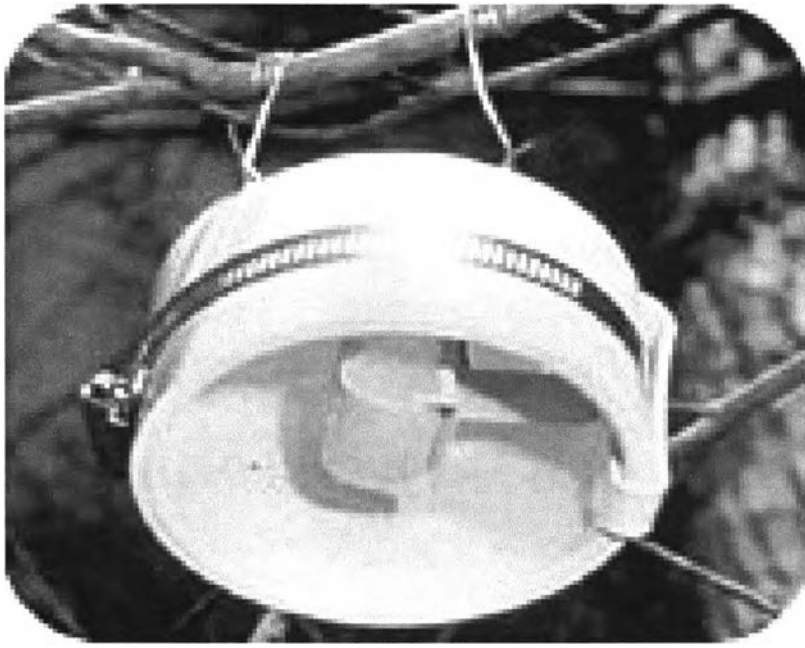
ง

รูปที่ 2.1 แสดงแฟลชซีฟก๊าสแซมเปิลที่ใช้ในการตรวจวัดการได้รับสัมผัสของบุคคล

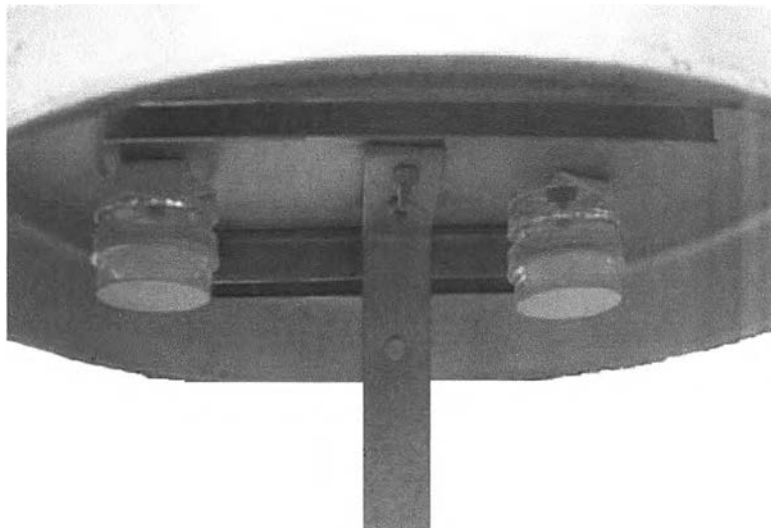
ก. และ ข. แฟลชซีฟก๊าสแซมเปิลของบริษัท 3M

ค. แฟลชซีฟก๊าสแซมเปิลของOgawa &Company

ง. แฟลชซีฟก๊าสแซมเปิลที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยนี้



รูปที่ 2.2 แสดงแพสซีฟก๊าซแชนเนลกับอุปกรณ์ในการป้องกันที่ใช้ในการตรวจวัดในสิ่งแวดล้อม
ของ Ogawa & Company



รูปที่ 2.3 แสดงแพสซีฟก๊าซแชนเนลกับอุปกรณ์ในการป้องกันที่ใช้ในการตรวจวัดในสิ่งแวดล้อม
ที่ผู้ทำการวิจัยใช้ในการศึกษาวิจัย

2.1.1 ส่วนประกอบและหลักการการทำงานของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอ

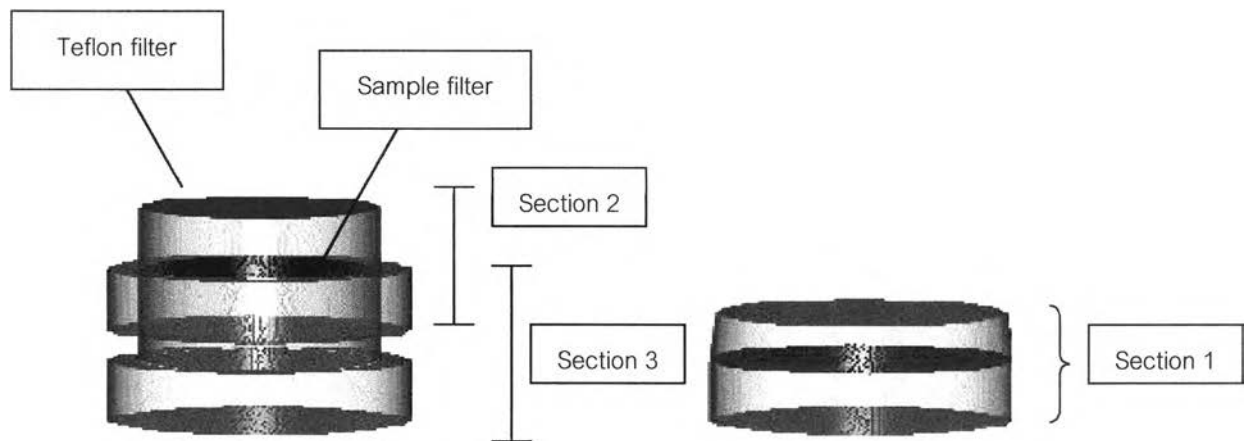
ส่วนประกอบของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอ

แพสซีฟก๊าซแชนเปลอประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่

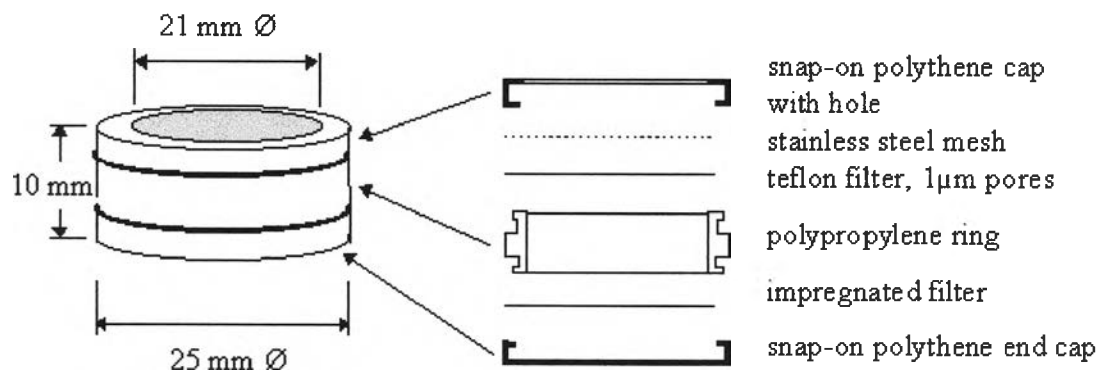
1. ส่วนประกอบที่เป็นโครงร่างของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอ เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ประกอบส่วนประกอบอื่นเข้าด้วยกัน โดยขนาดของพื้นที่หน้าตัดและความยาวของส่วนที่เป็นโครงร่างในส่วนของการแพร่ของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเก็บตัวอย่าง (sampling rate) ของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอซึ่งอัตราการเก็บตัวอย่าง (S) มีค่าเท่ากับ $D \cdot A/L$ (จะกล่าวถึงอีกครั้งในส่วนของทฤษฎี) ดังนั้นแพสซีฟก๊าซแชนเปลอที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันจะมีอัตราการเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกันและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซมลพิษ สำหรับวัสดุในการจัดทำส่วนประกอบนี้อาจทำจากโพลีเทนหรือ พลาสติกซึ่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละบริษัทที่จัดทำขึ้นมา ในบางสิ่งพิมพ์อาจเรียกส่วนประกอบนี้ว่า Cassette หรือ Cascade

2. แผ่นที่ถูกดูดซับด้วยสารเคมีที่ใช้ในการดูดซับสารมลพิษ (Impregnated Absorbing Pad) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระดาษกรองที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง (Sample filter) เป็นส่วนประกอบที่ประกอบไปด้วยกระดาษกรองและสารเคมีที่ใช้ในการดูดซับก๊าซมลพิษซึ่งในส่วนของกระดาษกรองนั้นโดยทั่วไปมักใช้ glass fiber filter ในขณะที่สารเคมีที่ใช้นั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของก๊าซมลพิษที่ต้องการตรวจวัด เช่น ในการตรวจวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เราจะใช้ sodium hydroxide ในขณะที่การตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียเราจะใช้ citric acid อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดก๊าซมลพิษชนิดเดียวกันก็อาจใช้สารเคมีในการดูดซับแตกต่างกัน เช่น ในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์สารเคมีที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ TEA (triethanolamine) และ sodium hydroxide กับ sodium iodide เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการดูดซับก็จะแตกต่างกัน สำหรับการใช้งานส่วนประกอบส่วนนี้ต้องทำการเปลี่ยนทุกครั้งเมื่อทำการเก็บตัวอย่าง ส่วนประกอบอื่นของแพสซีฟก๊าซแชนเปลอนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อย

3. Diffusion barrier เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการกักเก็บปริมาตรอากาศภายในแพสซีฟก๊าซแชนเปลอช่วยในการรักษาอัตราการเก็บตัวอย่าง (sampling rate) ให้คงที่และยังเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการป้องกันแมลงหรือฝุ่นละออง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการบินไปวิเคราะห์ด้วย Spectrometer โดยส่วนประกอบส่วนนี้อาจจะแตกต่างกันไปในแต่ละบริษัทที่ทำการผลิต แพสซีฟก๊าซแชนเปลอของบางผู้ผลิตอาจมีตะแกรงสแตนเลส (stainless steel mesh) และ teflon filter ในขณะที่บางผู้ผลิตอาจเพียง teflon filter เท่านั้น



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของแพลตชีฟก๊าสเซมเปลดที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบแพลตชีฟก๊าสเซมเปลดของCSIRO

หลักการทํางานของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล

แพสซีฟก๊าซแซมเปิลเป็นอุปกรณ์การตรวจวัดก๊าซมลพิษซึ่งแตกต่างจากอุปกรณ์การตรวจวัดอื่น เนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายก๊าซมลพิษในการเก็บตัวอย่างภายในอุปกรณ์หากแต่ใช้แรงธรรมชาติในการทำงาน ประกอบด้วยส่วนประกอบที่เปิดรับก๊าซมลพิษและส่วนประกอบที่ปิดในส่วนท้ายเพื่อทำการเก็บกักก๊าซมลพิษ มีหลักการทํางานโดยอาศัยหลักการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซมลพิษผ่านส่วนประกอบที่เปิดและแพร่ผ่าน diffusion barrier โดยมีอัตราการเก็บตัวอย่างคงที่ (sampling rate) ถูกจับบนกระดาษกรองที่ทำให้มีมัตต์ด้วยสารประกอบที่ละลายน้ำและมีความเฉพาะเจาะจงกับสารที่ทำการตรวจวัด (sample filter) ที่ส่วนปิดในส่วนท้ายของอุปกรณ์ โดยการแพร่ของโมเลกุลเป็นไปตาม Fick's first Law การตรวจวัดปริมาณทำได้จากการนำ sample filter ไปผ่านกระบวนการสกัดและกระบวนการในการวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์

2.1.2 ทฤษฎีของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล

ปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้ในการประยุกต์การออกแบบและการทำงานของแพสซีฟก๊าซแซมเปิลใหญ่ๆ 2 ทฤษฎีและเป็นพื้นฐานของทฤษฎีอื่น ทฤษฎีแรกเป็นทฤษฎีการดูดซึม (absorption) และการซึมผ่าน (permeation) ของสารมลพิษผ่านเมมเบรน ทฤษฎีที่สองเป็นทฤษฎีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุดและนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือทฤษฎีการแพร่ของโมเลกุลของสารมลพิษผ่านชั้นอากาศที่หยุดนิ่ง

ทฤษฎีที่ 1 ทฤษฎีการซึมผ่าน

แพสซีฟก๊าซแซมเปิลที่ใช้หลักการในการทำงานโดยอาศัยทฤษฎีการซึมผ่านผ่านเมมเบรนจะใช้หลักทฤษฎีการซึมผ่านที่การรับเข้าของมวลสารก๊าซมลพิษถูกกำหนดโดยลักษณะทางฟิสิกส์เคมีของเมมเบรนและก๊าซมลพิษ โดยการรับเข้าของมวลสารของก๊าซมลพิษจะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับค่าคงที่ของการซึมผ่าน ความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศและระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง อีกทั้งทฤษฎีการซึมผ่านถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นพิเศษในกรณีที่ทำการตรวจวัดก๊าซมลพิษในที่ที่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษที่ต้องการตรวจวัดกับสารระเหยหรือก๊าซรบกวนอื่นๆ หรือเมื่อตัวกลางที่ใช้เป็นของเหลว โดยมีหลักการในการทำงานที่เมมเบรนมีค่าความซึมผ่านสูงต่อสารมลพิษที่ทำการตรวจวัดและไม่ซึมผ่านในสารอื่นในบรรยากาศ และ/หรือตัวกลางในการ

ตรวจวัดความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศที่อาศัย ทฤษฎีการซึมผ่าน สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C = wk/t \quad (2.1)$$

โดย

C = ความเข้มข้นของสารมลพิษ, ppm

w = มวลสารที่ทำการตรวจวัดได้จากอุปกรณ์, μg

k = ค่าคงที่ของการซึมผ่าน, ppm-hours/ μg

t = ระยะเวลาในการตรวจวัด, hours

โดยค่าคงที่ในการซึมผ่านได้จากการทดลองและได้จากฟังก์ชันที่เฉพาะเจาะจงกับเมมเบรนและสารมลพิษที่ทำการตรวจวัด

ทฤษฎีที่ 2 ทฤษฎีการแพร่(ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้)

แพร่ก๊าซแก๊สแลกเปลี่ยนที่ใช้หลักการในการทำงานโดยอาศัยทฤษฎีการแพร่จะใช้หลักทฤษฎีที่การรับเข้าของก๊าซมลพิษถูกควบคุมด้วยพื้นที่หน้าตัดของเส้นทางในการแพร่ความยาวของเส้นทางในการแพร่และคุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของก๊าซมลพิษ โดยอัตราการเก็บตัวอย่าง (sampling rate) เป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การแพร่ พื้นที่หน้าตัดของเส้นทางในการแพร่และความยาวของเส้นทางในการแพร่

ทฤษฎีการแพร่เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารข้ามผ่าน concentration gradient ในเงื่อนไขสมภาวะคงที่ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก Fick's first law of diffusion ดังนี้

$$W = -DA \frac{dc}{dx} \quad (2.2)$$

โดย

W = อัตราการเคลื่อนย้ายของมวลสาร , ng/sec

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ , cm^2/sec

A = พื้นที่หน้าตัดของเส้นทางในการแพร่(diffusion path) , cm^2

$$dc/dx = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโดยจับพลันเหนือเส้นทางการแพร่} , \\ \text{ng/cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$$

เมื่อทำการพิจารณาสมการพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น $C_1 - C_0$ เหนือความยาวของเส้นทางการแพร่ทั้งหมด $X_1 - X_0 = -L$ ดังนั้นสมการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$W = \frac{DA(C_1 - C_0)}{L} \quad (2.3)$$

โดย

L = ความยาวของเส้นทางการแพร่(diffusion path),cm

C_1 = ความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศ, ng/cm³

C_0 = ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ผิวหน้าของอุปกรณ์ ng/cm³

ถ้าตัวกลางที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างสารมลพิษมีประสิทธิภาพ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ผิวหน้าของอุปกรณ์(C_0)สันนิษฐานได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์และทำการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วยเวลา(t) ดังนี้

$$M = \frac{DAC_1 t}{L} \quad (2.4)$$

โดย

M = มวลสารทั้งหมดที่ทำการเคลื่อนย้าย , ng

t = เวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างสารมลพิษ,sec

เมื่อพิจารณาในสมการพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จาก DA/L มีค่าเท่ากับ cm^3/sec ซึ่งเป็นหน่วยเดียวกันและมีความสัมพันธ์กับหน่วยของอุปกรณ์การเคลื่อนย้ายอากาศแบบแอคทีฟเช่นปั๊มที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างการได้รับสัมผัสสารมลพิษของบุคคล

จัดเรียงสมการใหม่:

$$C_1 = \frac{ML}{DA t} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) ถ้าเราทราบขนาดของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล (L/A) ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง (t) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เราสามารถทราบค่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่เก็บจากแพสซีฟก๊าซแซมเปิลและคำนวณความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศได้ อีกทั้งเราสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่หรือนำมาโดยตรงจากสิ่งตีพิมพ์ซึ่งได้ทำการศึกษาวิจัยก่อนหน้านั้น นอกจากนี้ เราเรียก L ,A และ D ที่อยู่ในรูป DA/L ว่า sampling rate ซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงในแต่ละอุปกรณ์

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การแพร่เป็นตัวกำหนดแนวโน้มในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นสูงสู่พื้นที่ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าโดยเรียกอัตราที่ก๊าซเคลื่อนที่ในขณะที่เกิดกระบวนการการแพร่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และมีขนาดระยะทางต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่หรือนำมาโดยตรงจากสิ่งตีพิมพ์

อย่างไรก็ตามวิธีการในการคำนวณที่แตกต่างกันในการประมาณการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้แก่ Grahams Law , Chapman Engskog Equation และ Stokes-Einstein relation เป็นต้น แต่วิธีการที่นำมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้คือ Chapman Engskog Equation

Chapman Engskog Equation

สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) สามารถคำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Chapman Engskog Equation ซึ่งขึ้นกับ collision theory ดังนี้

$$D = \frac{0.001858 T^{3/2} [M_1 + M_2]^{1/2}}{P \sigma_{12}^2 \Omega_D} \quad (2.6)$$

โดย

- M_1 = มวลโมเลกุลของก๊าซ
- M_2 = มวลโมเลกุลของอากาศ
- P = ความดัน (ในบรรยากาศ)
- σ_{12}^2 = ค่าคงที่ของแรง Lennard-jones สำหรับสารผสม (angstroms)

$$\Omega_D = \text{collision integral ขึ้นอยู่กับ Lennard-jones potential}$$

(dimentionless)

ค่าของ σ^2_{12} และ Ω_D สามารถคำนวณได้จากค่าคงที่ของแรง σ และ ϵ_0/k ทั้งในก๊าซและในอากาศ ดังตารางที่ 2.1 (Palmesและคณะ ,1976)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า σ และ ϵ_0/k ของ NO_2 และ Air

	σ	ϵ_0/k
NO_2	3.765 \AA	$210 \text{ }^\circ\text{K}$
Air	3.682 \AA	$84.6 \text{ }^\circ\text{K}$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) ที่อุณหภูมิ $21.1 \text{ }^\circ\text{C}$ (294.1K) ความดัน 1 บรรยากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับ NO_2 -air ที่ทำการคำนวณได้มีค่าเท่ากับ $1.54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ และจากสมการข้างต้นเราสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารมลพิษชนิดอื่นได้ดังตารางที่ 2.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Diffusion coefficient ของ Species ที่แตกต่างกัน

Species	Diffusion coefficient (m^2/s)
SO_2	$1.32 \cdot 10^{-5}$
NO_2	$1.54 \cdot 10^{-5}$
O_3	$1.52 \cdot 10^{-5}$
HNO_3	$1.32 \cdot 10^{-5}$
$(\text{COOH})_2$	$1.11 \cdot 10^{-5}$
HCHO	$1.60 \cdot 10^{-5}$

Grahams Law

Grahams Law ได้กำหนดว่าอัตราความสัมพัทธ์ของการแพร่ของก๊าซภายใต้สภาวะเดียวกันเป็นสัดส่วนตรงกันข้ามกับรากที่สองของความหนาแน่นของก๊าซในขณะที่ความหนาแน่นของก๊าซเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลโมเลกุลของก๊าซ ดังนี้

$$\frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (2.7)$$

ด้วยความสัมพันธ์นี้ทำให้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่ไม่ทราบค่า จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ทราบค่า โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในอากาศที่เราทราบค่าบางตัวมาแทนค่า ในสมการที่ 2.6 สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่ต้องการได้ จากข้อมูลดังตารางที่ 2.3 ทำให้เราสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของ SO_2 , NO_2 และ O_3 ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า Diffusion Coefficient ของ Gas mixture

Gas mixture	Conditions	Molecular Weight	Diffusion Coefficient (cm ² /s)	Source
H ₂ -air	20 °C, 1atm	2.01580	0.611	Chapman&Cowling in jost,p429
Methane	20 °C, 1atm	16.0400	0.196	Chapman&Cowling in jost,p429
O ₂ -air	20 °C, 1atm	31.9988	0.178	Chapman&Cowling in jost,p429
Co ₂ -air	18 °C, 1atm	44.0100	0.163	Loschmidt in jost,p408

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า Estimated Values For D จากข้อมูลในตารางที่ 2.3

Gas	Molecular Weight	Estimated Values for D (cm ² /s)	Average (cm ² /s)
SO ₂	80.0600	0.0970	0.105
		0.0877	
		0.1130	
		0.1210	
NO ₂	46.0100	0.1270	0.138
		0.1160	
		0.1480	
		0.1590	
O ₃	47.9982	0.1240	0.135
		0.1130	
		0.1450	
		0.1560	

Stokes-Einstein relation

ในการวัดพฤติกรรมการแพร่ของก๊าซโดยใช้ billiard ball ซึ่งเป็นโมเดลทางฟิสิกส์ ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของก๊าซได้ในโมเดลสันนิษฐานว่าโมเลกุลของก๊าซมีลักษณะแข็ง ไม่ทำปฏิกิริยา และมีความยืดหยุ่นเป็นทรงกลม

การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคในตัวกลางแขวนลอยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เป็นผลทำให้เกิดการปะทะแบบสุ่มกับโมเลกุลของตัวกลางแขวนลอย อนุภาคอื่น และผนังของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุโดยการตามจับของแต่ละอนุภาคนั้นมีการแข่งขันกันและมีเส้นทางที่ไม่แน่นอน การเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน(Brownian motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ละเอียดมาก เปรียบเสมือนการแพร่ของโมเลกุลก๊าซชนิดหนึ่งในก๊าซผสมเมื่อมลสารอนุภาคละเอียดหรือมลสารก๊าซแพร่ไปพบสิ่งกีดขวางก็จะเกาะติดผิว นั้น การแพร่จะมีบทบาทมากในการจับอนุภาคละเอียดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ไมโครเมตร หรือเล็กกว่า

อัตราการแพร่ของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของการเสียดสีของอนุภาค (Frictional coefficient) ตาม Einstein's law of diffusion (Furth ,1956)

$$D_f = kT \quad (2.8)$$

โดย

$$f = \text{friction coefficient (N.m}^{-1}.\text{s}^{-1})$$

$$k = \text{Boltzmann constant } 1.381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (K)}$$

สำหรับอนุภาคทรงกลมซึ่งแขวนลอยในของเหลวพบว่าค่า frictional coefficient สามารถหาได้โดย Stokes'Law

$$f = 3\pi\eta d \quad (2.9)$$

โดย

$$\eta = \text{ความเร็วของตัวกลาง (N.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$$

$$d = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (m)}$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) เกิดสมการ :

$$D = \frac{KT}{3\eta d} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 Stokes-Einstein relation พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสมบูรณ์(T) ความเร็วของตัวกลาง(η) และขนาดของอนุภาค(d) เมื่อมองที่โมเลกุลของก๊าซในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่า D แปรผันโดยอ้อมกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค โมเลกุลขนาดใหญ่จะแพร่ช้ากว่าโมเลกุลอนุภาคขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม Stokes Law มีพื้นฐานจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลว และเป็นหลักฐานที่มีเหตุผลเมื่อรัศมีของอนุภาคมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีของตัวกลางของเหลวเหล่านั้นผ่านขณะอนุภาคเคลื่อนที่(Furth, 1956) ในกรณีที่มีโมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านอากาศทั้งอนุภาคของก๊าซที่สนใจและอากาศเหล่านั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะประยุกต์ใช้ correction factor (C_c) ในสูตรของ Stokes ซึ่งได้มาจากทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

$$D = \frac{KTC_c}{3\eta d} \quad (2.11)$$

correction factor (C_c) คำนวณจากขนาดของโมเลกุลซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของ mean free path ของอากาศ โดย mean free path ของอากาศอธิบายจากค่าเฉลี่ยของระยะทางที่เคลื่อนที่ของโมเลกุล A ก่อนที่จะเผชิญกับโมเลกุล B อีกทั้ง mean free path ของตัวกลางขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซและขนาดของอนุภาคของก๊าซแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของก๊าซเป็นสิ่งที่กระทำได้ยากซึ่งโมเลกุลส่วนใหญ่ไม่มีลักษณะเป็นวงกลม ถึงกระนั้น mean free path ของอากาศสามารถทำการคาดคะเนได้จากความเร็วของอากาศที่ใช้ในทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

$$\lambda_{air} = \frac{2\mu_{air}}{p\sqrt{8M}} \quad (2.12)$$

$$\sqrt{\pi RT}$$

โดย

$$\mu_{\text{air}} = \text{ความเร็วของอากาศ (kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1})$$

$$p = \text{ความดัน (1.013*10}^5 \text{ kg. m}^{-1}.\text{s}^{-2})$$

$$M = \text{มวลโมเลกุลของอากาศ}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J.mol}^{-1} .\text{k}^{-1})$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (K)}$$

ดังนั้นจากสมการ 2.12 ค่า λ_{air} คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{air}} &= \frac{2 * 1.8 * 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}}{1.013 * 10^5 \text{ kg. m}^{-1}.\text{s}^{-2} \sqrt{8 * 28.8}} \\ &\quad \sqrt{\pi} * 8.314 * 298 \\ &= 0.0651 \mu\text{m} \end{aligned}$$

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า mean free path of air พบว่า correction factor สำหรับ Stokes-Einstein relation (C_c) มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 แต่ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า mean free path of air สามารถทำการคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_c = 1 + 1.657(2\lambda/d) \quad (2.13)$$

โดย

$$\lambda = \text{mean free path of air}$$

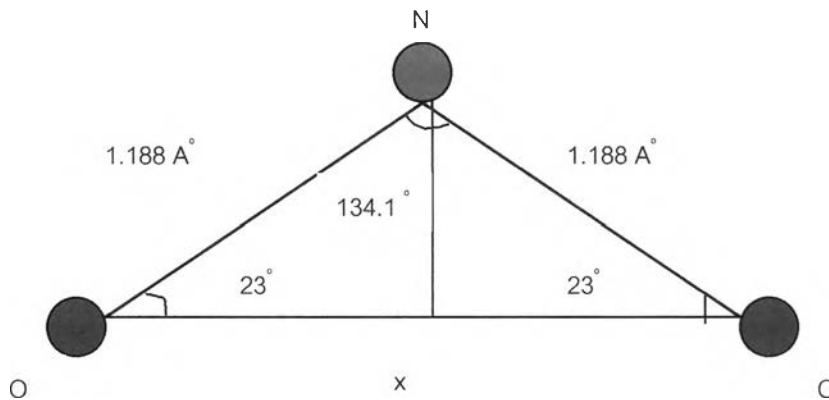
$$d = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (m)}$$

สมการเหล่านี้สามารถใช้เมื่อทราบเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่สนใจอย่างไรก็ตาม เป็นสิ่งที่ยากดั่งที่กล่าวมาแล้วในการประมาณการเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลของก๊าซซึ่งโดยปกติไม่มีลักษณะเป็นวงกลม ความยาวของพันธะและมุมของพันธะของโมเลกุล NO_2 , SO_2 และ O_3 แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงความยาวของพันธะและมุมของพันธะของโมเลกุล NO_2 , SO_2 และ O_3

Gas	Bond length	Bond Angel	Reference
NO_2	N-O $1.188 \pm 0.005 \text{ \AA}$	O-N-O $134.1 \pm 0.25^\circ$	Weast .1977 pg F-217
SO_2	S-O 1.4321 \AA	O-S-O 119.54°	Weast .1977 pg F-217
O_3	O-O 1.28 \AA	O-O-O 117°	Cotton, Wilkinson et al.1987

รูปที่ 2.6 แสดงโมเลกุลของไนโตรเจนไดออกไซด์ซึ่งความยาวของ 2 พันธะมีขนาดเท่ากันความยาวพันธะระหว่างออกซิเจนคือ x เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงโมเลกุลของไนโตรเจนไดออกไซด์

$$\begin{aligned} \cos 22.95 &= 1/2x / 1.188 \text{ \AA} \\ x &= 2 \cos 22.95 * 1.188 \text{ \AA} \\ x &= 2.188 \text{ \AA} \end{aligned}$$

จากวิธีการคำนวณข้างต้นสามารถนำวิธีการข้างต้นไปใช้ในการคำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางของไอโซนและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผลการคำนวณแสดงดังนี้เส้นผ่าศูนย์กลางของ $\text{SO}_2 = 2.475 \text{ \AA}$ และ $\text{O}_3 = 2.183 \text{ \AA}$

เมื่อนำความยาวซึ่งเป็นตัวแทนของระยะทางที่ยาวที่สุดภายในโมเลกุลซึ่งใช้เป็นค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแทนในสมการที่ 2.13 ได้ผลดังนี้

$$C_c = 1 + 1.657(2\lambda/d) \quad (2.13)$$

$$C_c = 1 + 1.657(2 \cdot 0.0651 \cdot 10^{-6} \text{ m} / 2.188 \cdot 10^{-8} \text{ m})$$

$$C_c = 10.86$$

แทนค่าที่ได้ในสมการที่ 2.11 :

$$D = \frac{KTC_c}{3\eta d} \quad (2.11)$$

โดย

$$k = \text{Boltzmann constant } 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} \text{ จาก } 1 \text{ J} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$$

$$k = \text{Boltzmann constant } 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ 1 kg.m}^2.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (298 K)}$$

$$C_c = \text{Stokes correction factor (ไม่มีทิศทาง)}$$

$$\eta = \text{ความเร็วของตัวกลางในอากาศ (} 182.7 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} \text{ ที่ } 17^\circ\text{C)}$$

(West, 1977)

เมื่อแทนค่าในสมการ ผลดังนี้ :

$$D = \frac{1.381 \cdot 10^{-23} \text{ 1 kg.m}^2.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1} \cdot 298 \text{ K} \cdot 10.86}{3\eta \cdot 182.7 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} \cdot 2.188 \cdot 10^{-8} \text{ m}}$$

$$D = 1.186 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

เมื่อทำการพิจารณาโมเดลที่ใช้ในการคำนวณค่า diffusion coefficient ซึ่งระบุว่าอนุภาคมีลักษณะกลมแข็งนั้นไม่มีความเหมาะสมเพียงพอ เนื่องจากพฤติกรรมของก๊าซในความเป็นจริงมีปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศดังนั้นจึงยากในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลของก๊าซและจากการประมาณการเหล่านี้จะนำมาสู่ความผิดพลาดในการคำนวณ

2.1.3 ผลกระทบของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่อการแพร่

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตั้งทฤษฎีต่างๆข้างต้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นปัจจัยที่ใช้ในการอธิบายอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของก๊าซมลพิษ ผ่านอากาศสู่ sample filter โดยอัตราการแพร่ของโมเลกุลเป็นฟังก์ชันของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความดันอากาศ ความเร็วลมและความชื้น ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะคำนวณปริมาณผลกระทบของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่างๆเหล่านี้

อุณหภูมิ ความดันและความชื้นสัมพัทธ์

จาก Chapman Engskog Equation เราพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่, D มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$D \propto \frac{T^{3/2}}{P} \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อ 2 ด้านที่ตรงข้ามกันต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ จาก ideal gas equation แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรและจำนวนโมลของก๊าซ

$$pV = nRT \quad (2.15)$$

ความเข้มข้นของก๊าซที่ทำการตรวจวัด (c_1) มีค่าเท่ากับมวลสาร(m)ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(V)และ $m=nM$ โดย M คือมวลสารทั้งหมดที่ทำการถ่ายเทลงบนแพสซีฟก๊าซแซมเปิล ดังนั้นเราสามารถจัดเรียงสมการใหม่ได้ดังนี้

$$p = \frac{c_1 RT}{M} \quad (2.16)$$

ด้วยความสัมพันธ์จากสมการข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความดันบรรยากาศลดลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น(จากสมการที่2.14) อย่างไรก็ตาม เมื่อความดันลดลงความเข้มข้นของสารมลพิษในบรรยากาศที่เราทำการตรวจวัด(c)ก็จะลดลงด้วย(จากสมการที่ 2.16)

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (พิจารณาสมการ 2.14) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $T^{3/2}$ (พิจารณาสมการ 2.16) อย่างไรก็ตาม จาก ideal gas equation การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ความเข้มข้นนั้นลดลง เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.14 และสมการที่ 2.16 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซมลพิษที่ทำการตรวจวัดจากบรรยากาศ sample filter เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $T^{3/2}/T = T^{1/2}$ หรือ \sqrt{T} นอกจากนี้แล้วยังพบอีกว่ามวลสารที่เก็บตัวอย่างได้จากแพสซีฟก๊าซแซมเปิล(M) นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ ($M \propto T^{1/2}$) แต่เป็นอิสระจากความดัน

เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิบรรยากาศ สัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น 0.5% ต่อ °C และมวลสารที่เก็บตัวอย่างได้จากแพสซีฟก๊าซแซมเปิลจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 0.2% ต่อ °C ดังนั้นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจาก 25 °C ถึง 30 °C ถ้าไม่ถูกต้องจะนำมาสู่ความผิดพลาดน้อยกว่า 1% ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงจาก 5 °C ถึง 35 °C จะนำมาสู่ความผิดพลาดประมาณ 5% (Rose และ Perkins, 1982) และจากงานวิจัยของ Lindenboom และ Perkin ปี 1982 พบว่าความดันจะไม่ส่งผลต่อการตรวจวัดจนกระทั่งความดันลดลงเป็น 2 ใน 3 ของบรรยากาศจึงส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัด

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว Rose และ Perkins ในปี ค.ศ. 1982 ได้ทำการศึกษาพบว่ามีความสำคัญในการสูญเสียก๊าซมลพิษที่ทำการตรวจวัดจากอุปกรณ์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% แต่ในทางตรงกันข้ามความสูญเสียเหล่านี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 10%

ความเร็วลมและทิศทาง

ในการศึกษาของ Lee และคณะ ปี ค.ศ. 1993 จากผลกระทบของความเร็วลมต่อการตรวจวัด ก๊าซ NO_2 ด้วยแพสซีฟก๊าซแซมเปิลโดยใช้ wind tunnel แสดงได้จากสมการความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer coefficient, K_{og}) ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของ สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) และความยาวของเส้นทางในการแพร่ (L)

จากสมการที่ (2.5) ซึ่งได้มาจาก Fick's law of diffusion :

$$C_1 = \frac{ML}{DA t} \quad (2.17)$$

จากสมการความสัมพันธ์ ของLee และคณะ :

$$C_1 = \frac{M}{K_{og} At} \quad (2.18)$$

โดย

M = มวลสารทั้งหมดที่ทำการถ่ายเท (g)

K_{og} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (m/s)

A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

T = ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง(s)

Leeและคณะได้ทำการวัดพารามิเตอร์เหล่านี้ทางคณิตศาสตร์โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจากการวัดความเข้มข้นของก๊าซโดยใช้ทั้งแฟลชพีแก๊สแชนเปลอและchemiluminescence detectorและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร และแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$K_{og} = \frac{2.495}{21.543 - (0.078RH) + \frac{1}{WV+0.06}} \quad (2.19)$$

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นพบว่าเมื่อความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0 - 0.3 m/s จะส่งผลกระทบต่ออัตราการเก็บตัวอย่าง(sampling rate) ในขณะที่เมื่อความเร็วลมสูงกว่า 0.3 m/sอัตราการเก็บตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในขณะเดียวกันในปีค.ศ.1976 Palmes และคณะได้ทำการศึกษาความเร็วลมและทิศทางต่อประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างก๊าซมลพิษ โดยการศึกษาทิศทางลมทำการศึกษาทิศทางลมที่ทำมุม 0 °(ทิศทางเดียวกับลม) , 45 °, 90 °, 135 ° และ180°(ทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางลม) และในการศึกษาความเร็วลมศึกษาความเร็วลมที่ระดับต่างๆได้แก่ 103 ฟุต/นาที่ 206 ฟุต/นาที่ 309 ฟุต/นาที่ 412 ฟุต/นาที่ และ515ฟุต/นาที่ ผลการศึกษาพบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการรับเข้าของก๊าซมลพิษและที่มุม 45° ให้การรับเข้าสูงสุดแต่อย่างไรก็ดีผลของความเร็วลมและทิศทางส่งผลต่อประสิทธิภาพของแฟลชพีแก๊สแชนเปลอในอัตราที่น้อยมาก

2.1.4 เรขาคณิตของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล (Geometry of passive gas sampler)

จากการศึกษา Fick's first law of diffusion พบว่าพื้นที่หน้าตัดของเส้นทางการแพร่และความยาวของเส้นทางการแพร่ของแพสซีฟก๊าซแซมเปิลส่งผลกระทบต่อปริมาณของก๊าซมลพิษที่ทำการตรวจวัดได้จากแพสซีฟก๊าซแซมเปิล ดังสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{ML}{DA t} \quad (2.20)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์ข้างต้น ปริมาณก๊าซมลพิษที่แพสซีฟก๊าซแซมเปิลทำการเก็บตัวอย่างได้นั้น(M)จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของเส้นทางการแพร่ (A)และเป็นสัดส่วนตรงกันข้ามกับความยาวของเส้นทางการแพร่ของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล(L) เหล่านี้ส่งผลให้เกิดการพัฒนาในรูปแบบทางเรขาคณิตของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล จากจุดเริ่มต้นการพัฒนาอุปกรณ์แพสซีฟก๊าซแซมเปิลในการตรวจวัดก๊าซมลพิษโดย Palmและคณะในปีค.ศ.1976 ซึ่งถือว่าเป็นต้นแบบในการพัฒนาซึ่งมีลักษณะทางเรขาคณิต ขนาดความยาว 71mmและมีพื้นที่หน้าตัด 71mm² ดังนั้นเพื่อจะเพิ่มความไวในการเก็บตัวอย่าง(sensitivity) แพสซีฟก๊าซแซมเปิลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีขนาดความยาวของเส้นทางการแพร่ลดลงเป็น 8.85mm และใช้พื้นที่หน้าตัดของเส้นทางการแพร่ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มการดูดซับปริมาณก๊าซที่ทำการทดสอบโดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 835 mm² ด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตข้างต้นส่งผลให้ค่าอัตราการเก็บตัวอย่าง(sampling rate) เพิ่มมากขึ้นและระยะเวลาในการตอบสนองก๊าซมลพิษลดลง จากแพสซีฟก๊าซแซมเปิลของ Palmและคณะ โดยตารางต่อไปนี้แสดงการเปรียบเทียบเรขาคณิตของแพสซีฟก๊าซแซมเปิลจากPalmและคณะและแพสซีฟก๊าซแซมเปิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบทางเรขาคณิตของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล

	Passive gas sampler Palm และคณะ	Passive gas sampler ในงานวิจัยครั้งนี้	Source
L	71 mm	8.85 mm	-
A	71 mm ²	8.35 mm ²	-
D*A/L (sampling rate)	1.54*10 ⁻⁸ m ³ /s	145 *10 ⁻⁸ m ³ /s	Palm และคณะ,1976
L ² /6D (response time)	54.56 second	0.848 second	Underhill,D.W.1983

2.1.5 ความเร็วลมกับเรขาคณิตของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล

จากงานวิจัยในระยะแรกของการพัฒนาแพสซีฟก๊าซแซมเปิลพบว่าความเร็วลมที่ผิวหน้าของอุปกรณ์ส่งผลต่อประสิทธิภาพแพสซีฟก๊าซแซมเปิล (Palm และ Gunnison, 1973) ต่อมาเมื่องานวิจัยขยายผลมากขึ้นจึงค้นพบว่าเมื่อความเร็วลมที่ผิวหน้าของอุปกรณ์น้อยเท่ากับความเร็วลมบริเวณผิวหน้าที่เปิดของอุปกรณ์เรียกความเร็วลมนี้ว่า ความเร็วลมวิกฤตที่ผิวหน้า (Critical face velocity) ส่งผลให้เกิด Starvation ที่ผิวหน้าของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล ความเด่นชัดของผลกระทบนี้มีความสัมพันธ์กับอัตราการเก็บตัวอย่างซึ่งเป็นฟังก์ชันทางเรขาคณิตของ(A/L) โดยในแพสซีฟก๊าซแซมเปิลชนิด badge จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่และความยาวสูงอีกทั้งอัตราในการรับเข้าสูงในขณะที่ต้องการความเร็วที่ผิวหน้าที่ต่ำคือ 0.05-0.1 m/sec แต่อย่างไรก็ตามก็สูงกว่าแพสซีฟก๊าซแซมเปิลชนิด tube ดังนั้นแพสซีฟก๊าซแซมเปิลเหล่านี้จึงไม่เหมาะกับการติดตามตรวจสอบในพื้นที่ที่มีการเคลื่อนที่ของอากาศเพียงเล็กน้อยทำให้บรรยากาศหยุดนิ่งส่งผลให้ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้มีค่าลดลง ถึงกระนั้นก็สามารถใช้ในการตรวจวัดปริมาณที่บุคคลรับสัมผัสได้เนื่องจากการเคลื่อนไหวตามธรรมชาติของร่างกายจะเพียงพอในการเคลื่อนที่ของอากาศที่ผิวของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล แพสซีฟก๊าซแซมเปิลชนิด tube ต้องการความเร็วที่ผิวหน้าต่ำเท่ากับ 0.001 m/sec (Brown และคณะ, 1981)

ในทางตรงกันข้ามแพสซีฟก๊าซแซมเปิลได้รับผลจากการที่ความเร็วลมที่ผิวหน้าสูงซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความปั่นป่วน (turbulence) ภายในช่องว่างการแพร่ใน แพสซีฟก๊าซแซมเปิลจากการทดลอง wind tunnel พบว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง(L/d) ที่สูงกว่า 2.5 – 3 จะไม่ได้รับผลกระทบของความเร็วลมอย่างมีนัยสำคัญ (Cole, 1983) และในงานวิจัยของ Kavanagh และคณะ ในปี 1980 และงานวิจัยของ Samimi และ Falbo ในปีค.ศ. 1983 แสดงให้เห็นว่าผลเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อย และวิธีการในการป้องกันการเกิด Scooping-out คือการใช้อัตราการเก็บตัวอย่างที่สูงในแนวตั้งฉาก

จากการศึกษาของ Gair และ Penketts ในปีค.ศ. 1995พบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อให้เกิดกระแสวนของการแพร่ (eddy diffusion) โดยสาเหตุมาจากอากาศเกิดการปั่นป่วน (turbulence) เคลื่อนย้ายยกตัวขึ้นในระยะทางที่แน่นอนทำให้ระยะทางความยาวในการแพร่ (diffusion length) ที่เกิดขึ้นจริงลดลงจากเดิมในการคำนวณผลสันนิษฐานว่าระยะทางความยาวในการแพร่(diffusion length) เท่ากับความยาวของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล(L) โดยระยะทางที่กระแสวนจะยกอากาศขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสวนและขึ้นอยู่กับพื้นที่ในสวนเปิดของแพสซีฟก๊าซแซมเปิล และจากการศึกษาพบว่าการแทรกตะแกรงเหนือสวนเปิดของแพสซีฟก๊าซแซมเปิลจะขจัดความผิดพลาดในเรื่องนี้ได้ อีกทั้งยังพบการผันแปรสูงในความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและการลดระยะทางความยาวในการแพร่

2.1.6 ความเสถียรของตัวอย่าง (Stability of Sampler)

เนื่องจากการเก็บตัวอย่างต้องมีการวางแผนในการวิจัยเพื่อใช้แพคเกจที่เข้าแซมเปิลในสถานที่ต่างๆกันและส่งตัวอย่างที่ทำการเก็บตัวอย่างสู่สถานที่ที่ใช้เป็นศูนย์กลางในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ถึงความเสถียรของตัวอย่างในระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการเตรียมตัวอย่างและก่อนการเก็บตัวอย่าง เท่าๆกับความสำคัญในการวิเคราะห์ความเสถียรของตัวอย่างในระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการเก็บตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ จากการศึกษาความเสถียรเหล่านี้โดย Palm และคณะในปีค.ศ. 1976 โดยการศึกษาแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกทำการศึกษามลของระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังจากการเตรียมตัวอย่างก่อนการนำไปตรวจวัดก๊าซมลพิษในระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 39 วัน กลุ่มที่สองทำการศึกษามลของระยะเวลาหลังการเก็บตัวอย่างและก่อนการวิเคราะห์โดยตัวอย่างถูกเตรียมที่วันที่ 0 แล้วทำการตรวจวัดทันทีและทำการวิเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 27 วัน กลุ่มที่สาม หลังการเก็บตัวอย่างนำตัวอย่างที่ได้รับการตรวจวัดมาทำการตรวจวัดตั้งแต่วันที่ 0 ถึง 169 วัน โดยผลแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงความเสถียรของตัวอย่างในการเก็บตัวอย่างทั้งก่อน-หลังการตรวจวัด

NO ₂ FOUND (%THEORETICAL ± S.D.) AS FUNCTION OF TIME OF STORAGE (DAYS) BEFORE OR AFTER EXPOSURE			
Time before	Found	Time After	Found
39	102 ± 4	0	98 ± 3
34	100 ± 7	0 ^a	90 ± 4
24	91 ± 3	2 ^a	98 ± 5
17	90 ± 4	3	99 ± 2
10	96 ± 2	6	99 ± 2
3	97 ± 4	13	101 ± 2
1	97 ± 4	27	110 ± 2
		28 ^a	95 ± 5
		84 ^a	96 ± 4
		139 ^a	91 ± 4

หมายเหตุ : ^a Series a which was started about 6 months after initial series

ผลสรุปจากงานวิจัยข้างต้นในตารางที่ 2.7 พบว่าค่าที่ได้แสดงความผันแปร $\pm 10\%$ โดยไม่มีรูปแบบในการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนกับระยะเวลา ข้อสรุปในการเก็บรักษาตัวอย่างทั้งในกรณีการเก็บรักษาตัวอย่างก่อนการนำมาตรวจวัดสามารถทำการเก็บรักษาตัวอย่างนานประมาณเดือนเช่นเดียวกับการเก็บรักษาตัวอย่างภายหลังการตรวจวัดก่อนการนำมาวิเคราะห์ ด้วยเหตุนี้ระยะเวลาในการเก็บรักษาจึงไม่เป็นปัญหาต่อการทำงานวิจัยโดยสามารถส่งตัวอย่างสู่ศูนย์กลางในการวิเคราะห์แม้ว่าต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานโดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าที่ทำการตรวจวัดได้

2.1.7 แพลสซีฟก๊าซแชนเปลอในการตรวจวัดไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂ Sampler)

แพลสซีฟก๊าซแชนเปลอที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ถูกริเริ่มครั้งแรกในปี ค.ศ.1976 โดย Palm และคณะจากการขยายผลการศึกษาคิดค้นอุปกรณ์แรกที่ใช้หลักการการแผ่ผ่านของก๊าซเพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสในปี ค.ศ.1973 โดยในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ในปี ค.ศ.1976 ใช้ TEA (Trietanolamine) ทำหน้าที่เป็นสารเคมีที่ใช้ในการดูดจับ (พิจารณาในทฤษฎีที่กล่าวถึงแล้วในเบื้องต้น) จากผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ทำการตรวจวัดได้มีปริมาณที่มากกว่าที่มีอยู่จริงในบรรยากาศ ดังนั้นในปี ค.ศ.1984 Possazini และคณะได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคมี 3 ชนิดในการดูดจับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง iron(II) salt , diphenyl amine, และ mixture of iodide, arsenite และ ethylene glycol พบว่า arsenite และ ethylene glycol มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากใช้ระยะเวลาเฉลี่ยของแพลสซีฟก๊าซแชนเปลอที่ประสบความสำเร็จในการตรวจวัดเท่ากับนำเอาระยะเวลาที่แพลสซีฟก๊าซแชนเปลอที่ใช้สารเคมีชนิดอื่นในการตรวจวัดรวมกัน อีกทั้งยังเป็นสารเคมีที่ดูเหมือนว่าไม่ sensitive และสามารถเก็บรักษาไว้ได้หลายเดือนทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง อย่างไรก็ตามพบว่า การถูก oxidize ของ arsenite ทำให้ลดสภาพความเป็นด่าง (alkalinity) ของสารเคมีที่ใช้ในการดูดจับซึ่งทำให้ลดประสิทธิภาพการจับ NO₂ (Ferm และ Sjodin, 1992) ต่อมาในปี ค.ศ.1992 Ferm และ Sjodin ได้ค้นพบสารเคมีชุดใหม่ในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยใช้โซเดียมไอโอไดด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีในการดูดจับและวิเคราะห์ปริมาณ nitrite ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งนับว่าให้ผลในการตรวจวัดที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ด้วยเหตุผลต่างๆข้างต้นในการศึกษาการแผ่รังสีตรวจสอบก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในครั้งนี้จึงใช้โซเดียมไอโอไดด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีในการดูดจับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยการตรวจวัดใช้หลักการที่โซเดียมไอโอไดด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ดูดจับ NO₂ และเกิดการ reducing เปลี่ยน NO₂ เป็น NO₂⁻ เกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



หลังจากนั้นทำการสกัด NO_2^- ด้วยน้ำ และทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ nitrite โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์หลังจากทำปฏิกิริยากับ N-1naphthylethylenediamine dihydrochloride จนได้ end point เป็นสีชมพูเพื่อทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ NO_2^- ที่ตรวจวัดได้จากแพลตีสีก๊าซแชนเปลอ และคำนวณความเข้มข้นปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากสมการดังต่อไปนี้

$$[\text{NO}_2] = \frac{[\text{NO}_2^-]VL}{DA t} \quad (2.21)$$

- $[\text{NO}_2]$ = ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีหน่วยเป็นนาโนโมลต่อลูกบาศก์เมตร(nmoles/m³)
- $[\text{NO}_2^-]$ = ความเข้มข้นของnitriteในตัวอย่างมีหน่วยเป็นไมโครโมลาร์(μM)
- V = ปริมาตรของ demineralised waterที่ใช้ในการสกัดกระดาษกรองตัวอย่างมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร(mL)
- D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ $1.54 \cdot 10^{-5}$ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที (m²/s)
- L = ความยาวของเส้นทางในการแพร่ (diffusion path) ของแพลตีสีก๊าซแชนเปอมีหน่วยเป็นเมตร(m)
- A = พื้นที่หน้าตัดของเส้นทางในการแพร่(diffusion path)ของแพลตีสีก๊าซแชนเปอมีหน่วยเป็นตารางเมตร(m²)
- t = ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างมีหน่วยเป็นวินาที(s)

การเปลี่ยนหน่วย

การเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูป ppbv สามารถทำได้ดังสมการต่อไปนี้

$$[\text{ppbv}] = \frac{[\text{NO}_2]RT}{1000} \quad (2.22)$$

- $[\text{NO}_2]$ = ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีหน่วยเป็นนาโนโมลต่อลูกบาศก์เมตร(nmoles/m³)
- R = ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 0.0821(L*atm/mol*k)
- T = อุณหภูมิระหว่างการเก็บตัวอย่างมีหน่วยเป็นเคลวิน(K)

2.2 ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

2.2.1 ลักษณะทั่วไป

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติมีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้ ลักษณะสีแดงเจือน้ำตาล มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติและเป็นรูปหนึ่งของไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จัดเป็นก๊าซมลพิษที่เป็น Photochemical Oxidants ที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตและส่งผลกระทบต่อสุขภาพเกิดจากการรวมตัวของไนตริกออกไซด์(NO)กับออกซิเจนในปฏิกิริยาoxidationโดยไนตริกออกไซด์เกิดจากเชื้อเพลิงซึ่งมาจากสารประกอบไนโตรเจนในเชื้อเพลิงและเชิงความร้อนจากการที่ก๊าซไนโตรเจน(N_2)ในอากาศถูกออกซิไดส์ที่อุณหภูมิสูงโดยไนตริกออกไซด์จากทั้ง 2 แหล่งจะถูกออกซิไดส์เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์อย่างรวดเร็วดังสมการต่อไปนี้

รูปแบบการเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ ($>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปแบบการเกิดไนโตรเจนไดออกไซด์ ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$)



หรือ



เช่น



เมื่อก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดขึ้นอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเช่นในสมการข้างต้นเมื่อก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาphotochemicalจะผลิตก๊าซโอโซนนับได้ว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดโอโซนซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ หรือเกิดการรวมตัวกับสารประกอบอื่นเกิดสารประกอบที่มีความเป็นพิษ เช่นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำในอากาศเป็น HNO_3 (กรดดินประสิว) ซึ่งอยู่ในรูปหมอกน้ำค้างไนเตรต(Nitrate Mist) หรือทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะไปเป็นอนุภาคของไนเตรตซึ่งเป็นอนุภาคที่มีพิษ เหล่านี้จึงนับได้ว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เป็นเพียงก๊าซมลพิษที่มีความสำคัญด้วยมลพิษของตัวเองแต่มีความสำคัญเนื่องจากการรวมตัวกับสารมลพิษชนิดอื่นก่อให้เกิดสารมลพิษที่มีความเป็นพิษมากกว่าส่งผลกระทบต่อทั้งสุขภาพของมนุษย์และสภาวะแวดล้อม

2.2.2 แหล่งกำเนิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดจากทั้งภาวะทางธรรมชาติได้แก่ ไฟาแลป ไฟาผ่า ภูเขาไฟระเบิด ปฏิกริยาของจุลินทรีย์ในดิน และจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ จากกยวดยานพาหนะ จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ จากเครื่องบินเช่นเครื่องบินที่มีความเร็วเหนือเสียงหรือเครื่องบินพาณิชย์ทั่วไป จากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งในส่วนของกระบวนการเผาไหม้ในการใช้เชื้อเพลิงภายในโรงงานอุตสาหกรรมและจากกระบวนการผลิตเช่นในอุตสาหกรรมการผลิตกรดดินประสิวและอุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเช่นการทำวัตุระเบิด จากกระบวนการเผาไหม้จากการเกษตรกรรม จากกระบวนการเผาไหม้ในการเผาขยะมูลฝอย และจากการใช้เชื้อเพลิงภายในบ้าน เช่นจากเครื่องทำความร้อน แม้ว่าปรากฏการณ์ทางธรรมชาติเป็นแหล่งผลิตก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มากกว่าจากการกระทำของมนุษย์แต่การปล่อยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์จากธรรมชาติไม่มีนัยสำคัญในเทอมของความอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทั้งนี้เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มาจากแหล่งธรรมชาติต่างๆทั่วโลกและโดยทั่วไปจะผลิตเป็นความเข้มข้นเล็กน้อยในบรรยากาศ ความสัมพันธ์ที่มีบทบาทเพียงเล็กน้อยของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากภาวะทางธรรมชาติ สามารถพิจารณาได้จากการที่พบว่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x , โดยปกติหมายถึงรวมถึงไนโตรเจนไดออกไซด์กับไนตริกออกไซด์) ในภาวะทางธรรมชาติบนพื้นโลกมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 9.4 ไมโครกรัม/คิวบิกเมตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ในเขตเมืองทั่วโลกมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 90 ไมโครกรัม/คิวบิกเมตร (World Bank ,1988:218) ดังนั้นแหล่งกำเนิดของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่สำคัญนั้นเกิดจากการกระทำของมนุษย์ และจากการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดไนโตรเจนไดออกไซด์พบว่า 75% ของปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่มาจากกระทำของมนุษย์ มาจากการปล่อยของยวดยานพาหนะและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ 30-40 %มาจากสารประกอบไนโตรเจนจากกระบวนการเกษตรกรรม

จากการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ทั่วโลกในช่วงปี ค.ศ 1980 ถึง ค.ศ. 2005 ในตารางที่ 2.8 ทั้งในส่วนของปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ทั่วโลกและในประเทศกำลังพัฒนาพบว่า ในส่วนของการขนส่งเป็นแหล่งกำเนิดไนโตรเจนออกไซด์หลักในขณะที่ในส่วนของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดอันดับที่ 2 อีกทั้งปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์รวมมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นทุกปีตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 ถึง ค.ศ.2005

ตารางที่ 2.8 แสดงผลสรุปของการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในปี ค.ศ.1980-2005

เขตพื้นที่	Billion grams of NO _x			
	1980	1986	1995	2005
ผลสรุปประเทศกำลังพัฒนา				
- การขนส่ง	6196(48%)	7750(48%)	11853(49%)	16075(45%)
- ที่พักอาศัย / หน่วยธุรกิจ	2236(17%)	2106(13%)	2615(11%)	3088(9%)
- อุตสาหกรรม	1536(12%)	1766(11%)	2365(10%)	3194(9%)
- การผลิตกระแสไฟฟ้า	2271(18%)	3633(23%)	6071(25%)	11455(32%)
- อื่นๆ	644(5%)	852(5%)	1349(6%)	1948(5%)
รวมทั้งหมด	12883(100%)	16107(100%)	24253(100%)	35760(100%)
ผลสรุปของโลก				
- การขนส่ง	32192(42%)	33808(42%)	40178(43%)	45375(39%)
- ที่พักอาศัย / หน่วยธุรกิจ	6984(9%)	7003(9%)	7838(8%)	8753(8%)
- อุตสาหกรรม	11446(15%)	10532(13%)	11257(12%)	13276(12%)
- การผลิตกระแสไฟฟ้า	23626(31%)	25279(31%)	29679(32%)	41453(36%)
- อื่นๆ	2910(4%)	3860(5%)	4542(5%)	6045(5%)
รวมทั้งหมด	77158(100%)	80482(100%)	93494(100%)	114902(100%)

หมายเหตุ: จาก OECD/IEA (1991 : 149-150)

และเมื่อทำการพิจารณาต่อไปถึงปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในประเทศที่พัฒนาแล้วพร้อมทั้งปริมาณที่สามารถควบคุมได้อย่างในสหรัฐอเมริกาพบว่าจากการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์(NO_x)ในประเทศสหรัฐอเมริกาในปีค.ศ.1960-1998จากแหล่งกำเนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์(NO_x)ที่ปล่อยในสหรัฐอเมริกาปีค.ศ.1960-1998(ล้านตันปี)

ประเภทของแหล่งกำเนิด	1960	1970	1980	1990	1995	1998
การเผาไหม้เชื้อเพลิงของแหล่ง อยู่หนึ่ง	5.2	10.0	14.8	19.7	22.7	25.8
การขนส่ง	8.0	11.7	15.4	19.1	21.6	25.1
การกำจัดของทิ้งของแข็ง	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0
ปริมาณสูญหนีจากกระบวนการ อุตสาหกรรม	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
การเผาทางเกษตรกรรม	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8
อื่นๆ	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ยอดรวม	14.0	22.7	31.7	37.7	46.7	53.7
ยอดรวมที่ควบคุมได้	13.8	22.6	31.5	37.4	46.3	53.2

จากตารางการศึกษาข้างต้นจะพบว่าแม้ว่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในสหรัฐอเมริกาจากแหล่งต่างๆจะมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทุกปีหากแต่ความสามารถในการควบคุมปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์อยู่ในปริมาณสูงมาก และเมื่อพิจารณาถึงแหล่งใหญ่ที่ก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในสหรัฐอเมริกา พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแหล่งอยู่หนึ่งและการขนส่งก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณมาก ดังนั้นจากการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในประเทศกำลังพัฒนา สหรัฐอเมริกา และโลก พบว่าแหล่งกำเนิดหลักซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์คือกระบวนการการขนส่งซึ่งเป็นก๊าซมลพิษสำคัญที่จะทำการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อย่างรวดเร็วดังได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแหล่งกำเนิดข้างต้นเป็นแหล่งกำเนิดหลักที่ก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

เมื่อกลับมาพิจารณาถึงปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในประเทศไทยจากการประมาณการปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากแหล่งกำเนิดต่างๆพบว่าตั้งแต่ปีค.ศ. 1992 จนถึงปีค.ศ. 1998 จากกระบวนการการขนส่ง กระบวนการการผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรมจากที่พักอาศัยและหน่วยธุรกิจ และแหล่งอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.10 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.10 แสดงผลสรุปของการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในประเทศไทยปี 1992-1998

ประเภทของแหล่งกำเนิด	NO _x 10 ³ ตัน						
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
การขนส่ง	261	304	343	394	422	463	409
ผลิตกระแสไฟฟ้า	140	149	162	179	206	227	212
อุตสาหกรรม	107	134	141	160	192	182	151
ที่พัก&ธุรกิจ	53	49	47	43	40	41	42
อื่นๆ	90	76	81	78	86	77	90
รวมทั้งหมด	651	712	774	854	946	990	904

หมายเหตุ : จาก DEDP THAILAND ENERGY SITUATION 1998

จากตารางผลสรุปการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในประเทศไทยพบว่าแหล่งที่ก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์แสดงผลเช่นเดียวกันกับในประเทศกำลังพัฒนา สหรัฐอเมริกา และประเทศทั่วโลกคือแหล่งกำเนิดใหญ่ที่ก่อให้เกิดไนโตรเจนไดออกไซด์มาจากการขนส่ง โดยการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดที่รองลงและเมื่อวิเคราะห์ต่อไปถึงปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์รวมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ พบว่ามีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทุกปีตั้งแต่ปีค.ศ. 1992-1997 และลดลงในปี ค.ศ. 1998 โดยพบว่าในแหล่งกำเนิดการขนส่งและโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณลดลงมาก ในขณะที่ในส่วนของการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากเกิดภาวะวิกฤติของเศรษฐกิจ

2.3 ผลกระทบของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อสุขภาพมนุษย์

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจเป็นพิเศษทั้งนี้เนื่องจากมนุษย์หายใจอากาศเข้าและออกวันละสองหมื่นถึงหลายหมื่นครั้งหรือคิดเป็นอากาศที่หายใจเข้าออกจากปอดวันละ 18,925 ลิตรต่อวัน ดังนั้นการพิจารณากายวิภาคและการหายใจเข้าออกรับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ของระบบทางเดินหายใจจึงเป็นสิ่งที่จะต้องกล่าวถึงในลำดับต่อไป

2.3.1 กายวิภาคของระบบทางเดินหายใจ

กายวิภาคของระบบทางเดินหายใจแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. ทางเดินหายใจส่วนต้น (Upper respiratory tract) ประกอบด้วยจมูก(nose) ปาก(oral) โฟรงปาก(pharynx) และ กล่องเสียง(larynx) ซึ่งอากาศที่หายใจเข้าไปในส่วนนี้จะถูกทำให้อุณหภูมิและความชื้นสูงขึ้น
2. ทางเดินหายใจส่วนล่าง (Lower respiratory tract) เริ่มจากท่อลม(trachea) หลอดลมใหญ่ขวาและซ้าย หลอดลมแขนงย่อยต่างๆจนถึงหลอดลมส่วนปลาย(Terminal bronchioles) ทางเดินหายใจส่วนนี้บุด้วยเซลล์ที่มีขนโบก(cilia) และเซลล์ที่สามารถขับเมือก(mucous) และเซลล์อื่นๆหลายชนิด
3. เนื้อปอด ได้แก่ ส่วนตั้งแต่แขนงข้อปอดไปถึงถุงลมขนาดเล็ก(Alveoli) โดยถุงลมขนาดเล็กนี้จะมีเส้นเลือดผ่าน ทั้งเส้นเลือดดำ(Pulmonary venous system) เส้นเลือดแดง(Pulmonary arterial system) และเส้นเลือดฝอย(Capillary) การแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนมอนนอกไซด์จะเกิดขึ้นที่ถุงลมนี้ นอกจากนี้เนื้อปอดยังมีท่อน้ำเหลือง เนื้อเยื่อ และพังผืดที่แทรกอยู่ระหว่างถุงลม(Interstitial tissue) และเนื้อเยื่อหุ้มปอด(Pleura) คลุมอยู่ 2 ชั้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อหุ้มปอดเรียกว่า(Pleural cavity)

2.3.2 กระบวนการหายใจในการรับก๊าซในโตรเจนไดออกไซด์

การหายใจเกิดจากกระบวนการลดความดันภายในปอด (negative pressure breathing) เพื่อให้อากาศถูกดูดเข้าปอด การลดความดันในปอดเกิดโดยการทำงานของกล้ามเนื้อซี่โครงและกระบังลมทำให้ซี่โครงถูกยกขึ้นจากตำแหน่งปกติและการที่กล้ามเนื้อกระบังลมหดตัวจะแบนลงผลคือปริมาตรของช่องอกจะเพิ่มขึ้นปอดจึงถูกดึงด้วยแรงดึงผิวให้ขยายปริมาตรออกทำให้แรงดันอากาศภายในอัลวิโอลัสลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อากาศภายนอกจึงถูกดูดเข้าทางช่องจมูกสู่อปอด ส่วนการหายใจออกโดยการทำงานของกล้ามเนื้อซี่โครงทำให้กล้ามเนื้อซี่โครงถูกดึงลงพร้อมกล้ามเนื้อกระบังลมคลายตัวกระบังลมจึงนูนขึ้น ผลทำให้ปริมาตรของช่องอกลดลงปอดก็จะถูกบีบให้ลดปริมาตรลง ความดันบรรยากาศในอัลวิโอลัสจึงเพิ่มขึ้นก็จะดันให้อากาศผ่านออกไปทางจมูก โดยมีขั้นตอนที่อากาศเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจดังนี้ อากาศที่หายใจเข้าไปผ่านทางจมูก เข้าสู่โพรงจมูกถูกรองด้วยขนจมูกและถูกทำให้ชุ่มชื้น จากนั้นผ่านฟาริงซ์แล้วเข้าสู่

ช่องลมที่มีแผ่นปิดเปิดช่องลมอยู่ด้านบน จากช่องลมเข้าสู่กล่องเสียงผ่านบริเวณลูกกระเดือกซึ่งเป็นผนังกระดูกอ่อนของกล่องเสียงที่มีสายเสียง(Vocal cord) ซึ่งอยู่ 1 คู่และจะสั่นเมื่อหายใจออก จากนั้นอากาศผ่านเข้าสู่เข้าสู่หลอดลมใหญ่หรือท่อลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16-18 มิลลิเมตร ซึ่งโครงสร้างของผนังมีรูปตัวซีของกระดูกอ่อนช่วยพยุงรูปร่างของท่อลมไม่ให้แฟบและแยกออกเป็นบรอนคัส(Bronchus)หรือหลอดลมย่อยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7-12 มิลลิเมตรซึ่งแยกเป็นหลอดลมย่อย 2 แขนง หลอดลมย่อยแต่ละแขนงจะแยกเข้าไปยังปอดซีกซ้ายและซีกขวาจากนั้นแตกแขนงซ้ำซ้ำกันเป็นท่อเล็กงเรียกว่า บรอนคิโอล (Bronchiole)หรือหลอดลมฝอย ระบบท่อทางเดินอากาศเหล่านี้ประกอบด้วยเยื่อเมือกที่มีซีเลียและมีเมือกเคลือบอยู่บางๆ เพื่อดักฝุ่นและสิ่งแปลกปลอมโดยการโบกพัดของซีเลีย บรอนคิโอลจะแตกแขนงโดยผนังบางลงเรื่อยๆจนปลายสุดแตกแขนงเป็นถุงลมมากมายซึ่งเรียกว่าอัลวิโอลัส(Alveolus)หรือถุงลมปอดบรอนคิโอลปลายสุด(Respiratory bronchiole)ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร นี้จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนก๊าซ โดยออกซิเจนในอากาศจะละลายน้ำที่เคลือบเป็นแผ่นฟิล์มแล้วแพร่ผ่านเยื่อเมือกปอดบริเวณนี้เข้าสู่กระแสเลือดในร่างแหเส้นเลือดฝอยที่แนบห่อหุ้มแต่ละอัลวิโอลัสโดยเลือดที่ได้รับออกซิเจนจะไหลกลับไปหัวใจและหัวใจจะสูบเลือดนี้ผ่านเส้นเลือดแดงใหญ่ไปหล่อเลี้ยงอวัยวะต่างๆทั่วร่างกาย ในขณะที่เดียวกันคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะแพร่ผ่านในทางตรงกันข้าม ดังนั้นจากจุดนี้ถ้าอากาศมีมลสารหรือก๊าซมลพิษอยู่จะส่งผลร้ายต่อหลอดแยก(bronchi)และถุงอากาศ(Alveoli) ซึ่งอาจนำไปสู่โรคหลอดลมอักเสบ(Bronchitis)หรือ Pulmonary Emphysema

2.3.3 ผลกระทบของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อระบบทางเดินหายใจ

เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ในอัตราที่ช้ามากจึงสามารถเข้าไปสู่ส่วนลึกของระบบทางเดินหายใจได้ง่ายและส่งผลกระทบต่อส่วนล่างของระบบทางเดินหายใจซึ่งรวมถึงหลอดลมเล็ก(Bronchioles)และถุงอากาศ Alveoliของปอด และจะเกิดผลกระทบที่ร้ายแรงมากกว่าเมื่อก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อยู่ร่วมกับอนุภาคหรือก๊าซอื่น เมื่อหายใจเข้าในรูปของผสมผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคตลอดจนความเข้มข้นและองค์ประกอบ เคมีของก๊าซมลพิษ โดยอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 5 ไมโครเมตรส่วนใหญ่จะถูกจับที่ส่วนบนของระบบทางเดินหายใจและเกาะติดอยู่ที่นั่น ในทางตรงกันข้ามอนุภาคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ไมโครเมตรจะเกาะแน่นที่ส่วนล่างของระบบทางเดินหายใจได้ง่ายมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคมีขนาดเล็กลงไปอีกระดับการเกาะติดจะกลับเพิ่มขึ้นอีก อนุภาคที่เกาะติดบนผนังของทางเดินระบบหายใจจะถูกขับออกไปที่คอโดยการเคลื่อนที่ของเส้นขน(Cilia)บนผนังแล้วรวมตัวเป็นเสมหะ(Sputum) อนุภาคที่เกาะติดในถุงอากาศซึ่งไม่มีขนจะเข้าไปในเยื่อปอดและบางครั้งก่อให้เกิดโรค Pneumoconiosis และเมื่อทำการศึกษถึงการได้รับก๊าซไนโตรเจน

ได้ออกไซด์พบว่าส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญทั้งการได้รับในระยะสั้นและการได้รับเป็นระยะเวลานาน

ผลกระทบจากการศึกษาโดยการทดลอง(Experiment Studies)

เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็น oxidizing agent จึงส่งผลกระทบต่อในการทำลายปอดด้วยคุณสมบัติดังกล่าว โดยไนโตรเจนไดออกไซด์ในปริมาณสูงจะนำไปสู่การอักเสบภายในปอดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางเดินหายใจขนาดเล็กใกล้ๆบริเวณแลกเปลี่ยนก๊าซในปอด ในขณะที่การศึกษาในสัตว์การได้รับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในปริมาณสูงส่งผลเสียในการลดความสามารถในการต่อสู้กับการติดเชื้อโดยปริมาณที่ทำการศึกษาก็จะสูงกว่าที่พบในบรรยากาศ และจากงานวิจัยชิ้นหนึ่งที่ทำการศึกษาในมนุษย์แสดงให้เห็นว่าไม่มีนัยสำคัญในการเพิ่มอัตราการติดเชื้อแม้ว่าจะมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ได้รับสัมผัสสูงขึ้นไป (Goings และคณะ, 1989) และในการได้รับในปริมาณความเข้มข้นที่สูงในระยะเวลายาวนาน อาจส่งผลต่อการเกิด lung scarring (fibrosis) และ Emphysema (การพองลมในเนื้อเยื่อในถุงลม) ในสัตว์ (Kubota และคณะ, 1987)

การศึกษาทางสรีระวิทยา(Physiological Studies)

ในงานวิจัยการศึกษาการได้รับสัมผัสของมนุษย์ พบว่าบ่อยครั้งที่ผลการวิจัยที่ออกมาขัดแย้งกัน ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับสัมผัสอยู่ในสถานที่ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ลักษณะที่แตกต่างกันของกลุ่มตัวอย่าง บ่อยครั้งจุดจบของปัญหาคือการตรวจวัดที่แตกต่างกันในการศึกษาทั้งการวิเคราะห์ของ Folinsbee ในปีค.ศ. 1992 พบว่าในบุคคลทั่วไปที่ได้รับสัมผัสก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่ำกว่า 1880 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (1000 ppb) พบว่า 47% ของบุคคลทั่วไปเพิ่ม Bronchial reactivity ในขณะที่ มากกว่า 79% แสดงการเพิ่มขึ้น ในขณะที่กลุ่มที่เป็นโรคหอบหืดการได้รับสัมผัสก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ 940 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (500 ppb) พบว่า 69% แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Bronchial reactivity ขณะพักผ่อน และ 51% ขณะออกกำลังกาย โดยสรุปคือกลุ่มบุคคลที่ป่วยเป็นโรคหอบหืดมีความไวต่อก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มากกว่ากลุ่มคนทั่วไปซึ่งไม่มีนัยสำคัญในการตอบสนองการได้รับสัมผัสที่ 1000 ppb และจากการศึกษาระดับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่ำสุดที่ส่งผลต่อผู้ป่วยโรคหอบหืด เท่ากับ 564 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (300 ppb) ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่พบในบรรยากาศของอังกฤษมาก (ค่าเฉลี่ยของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในอังกฤษ เท่ากับ 30 ppb)

การศึกษาระบาดวิทยาในระบบนิเวศน์(Ecological Epidemiological Studies)

การศึกษาในระยะสั้นจะมีการผันแปรมากที่สุดในการศึกษาปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศและสุขภาพพบว่าไม่มีผลกับการเข้ารับรักษาในโรงพยาบาลหรือการมีชีวิตอยู่ ในการศึกษาที่พินแวนจากการศึกษาของRossiและคณะปีค.ศ.1993แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และการเข้ารับรักษาในโรงพยาบาลหรือคลินิกและแนวโน้มในการเกิดโรคหอบหืดเมื่อนำผลจากก๊าซชนิดอื่นมาพิจารณา ในคณะที่งานวิจัยอื่นแสดงความสัมพันธ์ในระดับต่ำเมื่อแยกปัจจัยที่เกิดจากสารมลพิษชนิดอื่นออก โดยในงานวิจัยอื่นๆแสดงความคิดเห็นถึงการแสดงความสัมพันธ์ของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และการเข้ารับรักษาในโรงพยาบาลหรือการมีชีวิตอยู่โดยไม่มีการพิจารณาผลที่เกิดจากสารมลพิษชนิดอื่น เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์กับการเข้ารับรักษาในโรงพยาบาลหรือการมีชีวิตอยู่น้อยกว่าสารมลพิษชนิดอื่น

การศึกษา Panel ทางระบาดวิทยา(Epidemiological Panel Studies)

การศึกษาส่วนใหญ่แสดงถึงการไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างระดับไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศกับฟังก์ชันในการหายใจ(Respiratory function) อย่างไรก็ตามในการศึกษาที่มีการออกแบบแนวทางในการศึกษาที่ดีจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์และอาการทางระบบทางเดินหายใจในบุคคลทั่วไปและบุคคลที่ป่วยเป็นโรคหอบหืด ในการศึกษาในArizonaโดย Lebowitz และคณะในปีค.ศ.1987 พบว่ามีนัยสำคัญที่ไม่มีผลกับฟังก์ชันในระบบทางเดินหายใจ และจากการศึกษาในอังกฤษโดยHigginsและคณะในปีค.ศ.1995พบความสัมพันธ์ระหว่างระดับไนโตรเจนไดออกไซด์และฟังก์ชันของปอดของผู้ป่วยโรคหอบหืดแต่ไม่มีการตรวจวัดฝุ่นในการศึกษารั้งนี้ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศในPanelของแต่ละบุคคลที่เกิดขึ้นน้อยกว่าสารมลพิษชนิดอื่น

การศึกษาระบาดวิทยาในการศึกษาในระยะเวลายาวนาน (Long-term Epidemiological Studies)

การศึกษาโดยทั่วไปจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบในพื้นที่ที่มีภาวะมลพิษกับพื้นที่ที่ไม่มีภาวะมลพิษซึ่งมักไม่พบความแตกต่างระหว่างผลของความแตกต่างของก๊าซมลพิษ โดยการศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการได้รับสัมผัสก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในที่พักอาศัยและ

ทำการเปรียบเทียบระดับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ภายในที่พักอาศัยและภายนอกที่พักอาศัยและ เปรียบเทียบกับการเกิดอาการในโรคระบบทางเดินหายใจแต่ไม่พิจารณาฟังก์ชันของปอด (Lung function) ในเด็ก เช่นในงานของ Spenzer และคณะ ในปีค.ศ.1980และ Neasและคณะในปี ค.ศ.1991 ในทางตรงกันข้ามดูเหมือนว่าความจริงที่เกิดขึ้นในผู้ใหญ่จะพบความสัมพันธ์ระหว่าง ฟังก์ชันของปอดกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์แต่ไม่มีความสัมพันธ์ในอาการทางโรคทางเดินหายใจ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยในสหรัฐอเมริกาพบความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์และฟังก์ชันปอดในระดับต่ำในประชากรที่ยังอายุน้อยซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในระยะเวลาการได้รับ สัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์กับผลกระทบต่อฟังก์ชันปอดโดยผลเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในผู้ใหญ่เท่านั้นแต่ถึงกระนั้นหลักฐานก็ยังคงสับสนอยู่

2.3.4 ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อสุขภาพ มนุษย์จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระดับ ต่างๆดังแสดงต่อไปนี้ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในระดับต่างๆต่อสุขภาพของมนุษย์

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัสก๊าซ NO ₂	ผลกระทบต่อสุขภาพ	แหล่งที่มา
0.12	-	เริ่มรับรู้กลิ่น	Henscher และคณะ , 1960 Salamberidze , 1967
0.1	1 ชั่วโมง/วัน	เพิ่มความต้านทานของทางเดินอากาศ และเพิ่มความตึงตัวของทางเดินหายใจของผู้ป่วยหอบหืด	Oreheck และคณะ, 1976
1.0	15 นาที	เพิ่มความต้านทานของทางเดินหายใจในหลอดลม	U.S. EPA , 1983
0.7-2.0	10 นาที	เพิ่มความต้านทานของทางเดินหายใจ ทั้งการหายใจเข้าและออก	Suzuki และIshikawa, 1965
2.5	2 ชั่วโมง	เพิ่มความต้านทานของทางเดินอากาศในสุขภาพของผู้ใหญ่	U.S. EPA , 1983

ตารางที่ 2.11 (ต่อ) แสดงปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในระดับต่างๆต่อสุขภาพของมนุษย์

ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัสก๊าซ NO ₂	ผลกระทบต่อสุขภาพ	แหล่งที่มา
5	15 นาที	ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนย้ายก๊าซระหว่างเลือดและปอดในสุขภาพผู้ใหญ่ลดลง	U.S. EPA , 1983
10	-	ความสามารถในการตรวจวัดกลิ่นไนโตรเจนไดออกไซด์ลดลง	U.S. EPA ,1983
27-75	≤1 ชั่วโมง	เป็นโรคหลอดลมอักเสบ(Bronchitis) หรือ Bronchopneumonia ซึ่งอาจฟื้นตัวเป็นปกติได้	Grayson ,1956
50	-	เป็นโรคหลอดลมฝอยอักเสบ ซึ่งอาจฟื้นตัวได้	U.S. EPA ,1983
150	-	เสียชีวิต หลัง 2-3อาทิตย์โดยโรคหลอดลมฝอยอุดตัน (Bronchiolitis fibrosa obliterans)	U.S. EPA ,1983
300	-	เสียชีวิตทันที	U.S. EPA ,1983
300-500	-	เป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตด้วยน้ำคั่งเนื้อในปอดหรือสลับเนื่องจากขาดอากาศหายใจ	Grayson ,1956

2.4 การตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์แบบต่อเนื่อง

การตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องนั้น มี 2 วิธีได้แก่ วิธี Saltzman และวิธี Chemiluminescence ดังต่อไปนี้

2.4.1 วิธี Saltzman

วิธี Saltzman เป็นวิธีการในการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และไนตริกออกไซด์ (NO_x) โดยมีหลักการตรวจวัดโดยวิธีการดูดกลืนแสง (Light Absorption)ซึ่งใช้สาร Reagent

Saltzman

ไนโตรเจนไดออกไซด์(NO_2) จะกลายเป็นไนไตรท์ไอออนเมื่อละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับสาร Reagent Saltzman ให้สารย้อมสีอาโซ (Azo Dye) ซึ่งมีสีทึบหลาย การตรวจวัดความเข้มข้นของสีนี้ในสารละลายจะทำโดยวิธีการสเปกโตรเมตริก การตรวจวัดความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์(NO) ในตัวอย่างอากาศก็ใช้วิธีเดียวกันแต่จะทำหลังจากที่ออกซิไดส์ NO ให้เป็น NO_2 โดยสารละลายกรดกำมะถันและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

สาร Reagent Saltzman เป็นสารละลายของกรดซัลฟานิลิก (Sulfanilic Acid) , N-(1-Naphthyl) Ethylenediamine และกรดอะซิติก(Glacial Acetic Water)ในน้ำ เมื่อใส่ไนไตรท์ไอออนเข้าไปในสารละลายนี้ไนไตรท์ไอออนจะทำปฏิกิริยาควบคู่ (Coupling Reaction)แล้วเกิดสารย้อมสีอาโซ(Azo Dye) ซึ่งมีสีทึบแดง อัตราส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืนในสารละลายทำปฏิกิริยานี้จะแปรผกผันเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารย้อมสีอาโซที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงตรวจวัดความเข้มข้นของ NO_x ในอากาศได้จากการหาอัตราการดูดกลืนแสงถ้ารักษาอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและสารละลายให้คงที่

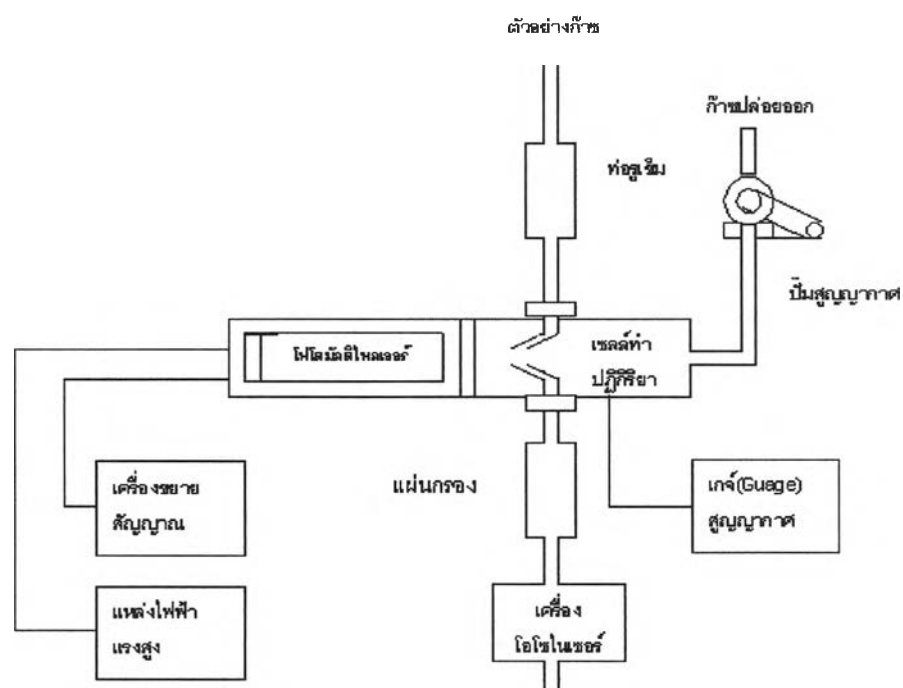
วิธีการในการทำงานของเครื่องตรวจวัด NO_x แบบเป็นคาบวิธีSaltzman จากปริมาณที่แน่นอนของสารละลายทำปฏิกิริยาจะถูกใส่ไว้ในขวดอิมพินเจอร์สองขวดแล้วปล่อยให้ตัวอย่างอากาศไหลผ่านขวดทั้งสองในอัตราที่คงที่ภายในคาบเวลาที่แน่นอน ไนโตรเจนไดออกไซด์จะถูกดูดกลืนในขวดอิมพินเจอร์แรก ส่วนไนตริกออกไซด์ซึ่งไม่ถูกดูดกลืนในขวดแรกจะถูกออกซิไดส์ให้เป็น NO_2 ก่อนในสารละลายของกรดกำมะถันและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งอยู่ในเครื่องออกซิไดเซอร์แล้วจึงถูกดูดกลืนในขวดอิมพินเจอร์ที่สอง การดูดกลืนของ NO_2 ในสารละลายทำปฏิกิริยา (Reagent Saltzman)จะไม่รวดเร็วเท่ากับการละลายของ SO_x ในสารละลายของกรดกำมะถันและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเครื่องวิเคราะห์ SO_2 ด้วยเหตุนี้จึงต้องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซให้คงที่ (ประมาณ 100-300 ml./min.) ต่อสารละลายทำปฏิกิริยา 30-50 mlและต้องใช้อิมพินเจอร์ที่ออกแบบพิเศษให้มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสูงขึ้น

อัตราส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 540-550 nmจะถูกตรวจวัดอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาวิเคราะห์ที่กำหนดไว้ ช่วงเวลาตรวจวัดค่ามิให้เล็กลงสองช่วงคือ 0-0.5 และ 0-1 ppm ระบบวิเคราะห์นี้ยังไม่มีสารรบกวนที่สำคัญ อย่างไรก็ตามเพื่อให้แน่ใจว่าการตรวจวัดเชิงสเปกโตรเมตริกมีความแม่นยำสูงตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน เครื่องวิเคราะห์นี้จึงต้องมีอุปกรณ์ปรับจุดศูนย์อย่างอัตโนมัติติดตามด้วยเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการดูดกลืนแสงซึ่งอาจเกิดจากการแปรเปลี่ยนของความเข้มข้นของแหล่งแสงและการติดสีเล็กน้อยของสารละลายทำปฏิกิริยา ประเทศที่ใช้การตรวจวัดวิธีการนี้เช่นประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น

2.4.2 วิธี Chemiluminescence

ในระยะหลังๆนี้เครื่องวิเคราะห์ NO_x ที่ใช้ปรากฏการณ์(Chemiluminescence) แสงสว่างจากปฏิกิริยาเคมีเริ่มเป็นที่นิยมกว่ากระบวนการเปียกซึ่งใช้สาร Reagent Saltzmanns ข้างต้นจุดเด่นของเครื่องวิเคราะห์แบบใหม่คือมีระยะเวลาการตอบสนองสั้น ประมาณ 3- 5วินาที และมีความแม่นยำสูง $\pm 1\%$ สำหรับในประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ใช้วิธีการนี้ในการตรวจวัด NO_x

เครื่องวิเคราะห์นี้ประกอบด้วยส่วนตรวจวัดและส่วนระบบไฟฟ้าอัตราการไหลของตัวอย่างก๊าซซึ่งดูดเข้าโดยปั๊มเก็บตัวอย่างจะถูกควบคุมโดยท่อรูเข็ม(Capillary) ก๊าซนี้จะไหลเข้าเซลล์ทำปฏิกิริยา(Reaction Cell) ในเวลาเดียวกันออกซิเจนจะถูกออกซิไดส์เป็นโอโซนในเครื่องโอโซนไนเซอร์ แล้วไหลเข้าเซลล์ทำปฏิกิริยาเพื่อทำปฏิกิริยากับ NO และ NO_2 ปั๊มสุญญากาศจะรักษาความดันภายในเซลล์ทำปฏิกิริยาไว้ประมาณ 1-5 Torr (mmHg) แสงสว่างที่เกิดขึ้นจะตรวจจับโดยเครื่องโฟโตมัลติพลีเออร์(Photomultiplier) สัญญาณที่ออกจากเครื่องตรวจจับจะถูกส่งผ่านเครื่องขยายสัญญาณ(Amplifier) และแสดงค่าออกเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า อนึ่งเครื่องโอโซนไนเซอร์จะเป็นแบบปล่อยไฟฟ้าเงียบ(Silent Discharge) หรือแบบระดมด้วยรังสีเหนือม่วง(UV-Irradiation) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงไดอะแกรมของเครื่องติดตามการตรวจวัด NO_x (วิธี Chemiluminescence)

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shi และ Harrison (1997) ทำการศึกษาการตรวจวัดไนโตรเจนออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ โอโซนและข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยาโดยใช้โมเดล OLS (ordinary least squares) และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นและทำนายความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์โดยโมเดล AR (autocorrelation) ในลอนดอน พบว่าความเร็วลมเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์อีกทั้งยังพบว่าปฏิกริยาระหว่างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และโอโซนเป็นปัจจัยหลักซึ่งมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ผลจากการวิเคราะห์จากโมเดล AR พบว่า มีค่า correlation coefficient สำหรับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์สูง ($R > 0.95$)

Kulkarni และ Patil (1998) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลในเขตเมือง Mumbai ประเทศอินเดีย โดยศึกษาในช่วงฤดูหนาว (กุมภาพันธ์ 1996) และฤดูร้อน (เมษายน 1996) โดยศึกษาในกลุ่มเป้าหมายจำนวน 43 คน พบว่าฤดูกาล ขนาดของบ้านและอาชีพมีอิทธิพลต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ในขณะที่อิทธิพลจากเชื้อเพลิงที่ใช้และระดับคุณภาพของอากาศกลับไม่มีอิทธิพลต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยสรุป คือการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ในฤดูหนาวมากกว่าในฤดูร้อน บุคคลที่อยู่ในบ้านขนาดเล็กและ/หรือมีอาชีพนอกบ้านจะได้รับสัมผัสปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์มากกว่า

Spengler และคณะ (1992) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลในเขตเมือง Los Angeles โดยศึกษาในช่วงเดือน พฤษภาคม 1987 ถึงเดือน พฤษภาคม 1988 โดยศึกษาในกลุ่มเป้าหมาย 700 คนจาก 500 ครอบครัว โดยใช้ Filter-badge ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์นอกบ้านและในบ้านเป็นตัวทำนายที่ดีที่สุดต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคล ในขณะที่เวลา/กิจกรรมเป็นตัวทำนายที่ขาดประสิทธิภาพ อีกทั้งยังพบว่าชนิดของเชื้อเพลิงมีความสำคัญโดยบ้านที่ใช้ก๊าซจะมีปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้านและระดับไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ และมีความสัมพันธ์กันสูงระหว่างปริมาณความไนโตรเจนไดออกไซด์ภายนอกบ้านและในห้องนอน

Schwab และคณะ (1994) ทำการศึกษาฤดูกาลและรูปแบบในปีต่อระดับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสและบรรยากาศภายใต้พักอาศัยใน Albuquerque New Mexico โดยระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 2 อาทิตย์ในช่วงมากกว่า 18 เดือนระหว่างปี ค.ศ. 1988 และ 1991 พบว่ามีความแตกต่างมากทั้งในส่วนของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในที่พักอาศัย

และค่าเฉลี่ยที่สมาชิกภายในที่พักอาศัยได้รับสัมผัส โดยสำหรับในที่พักอาศัยค่าเฉลี่ยภายในห้องนอนสูงขึ้นในฤดูหนาวในปีค.ศ.1990-1991 มากกว่าในปี1988-1989 25% ในขณะที่ในฤดูหนาวปีค.ศ.1988-1989 สูงมากกว่าในปี 1989-1990 4% และเมื่อทำการศึกษาระดับปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้านช่วงฤดูหนาวปีต่อปีพบว่ามีความสัมพันธ์จากค่า 0.53 จนถึงค่าสูง 0.88 อีกทั้งยังพบว่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้านไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

Levy (1998) ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วงฤดูหนาวโดยกลุ่มเป้าหมาย จาก18เมือง 15 ประเทศทั่วโลกโดยใช้ Passive Filter Badges พบว่าการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลค่อนข้างแตกต่างกันมากตั้งแต่ 11-51.5 ppb (ระยะเวลาการตรวจวัด 2 วัน) โดยการได้รับสัมผัสปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลมีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้าน ($r=0.75$) มากกว่าปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ภายนอกบ้าน ($r=0.57$) เมื่อพิจารณาในสถานการณ์เดียวกันทั่วโลก และพบว่าการใช้เตาก๊าซภายในบ้านส่งผลกระทบต่อปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัส 67% และเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณภายในบ้าน-นอกบ้านจาก 0.7เป็น 1.2 จากความสัมพันธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลและแหล่งกำเนิดของไนโตรเจนไดออกไซด์เช่นเตาก๊าซ หรือเครื่องทำความร้อนบอกว่าคุณสัมผัสเหล่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของประเทศใดประเทศหนึ่งโดยเฉพาะ

Monn และคณะ (1998) ทำการศึกษาปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์โดยทำการศึกษาในกลุ่มเป้าหมาย 500 คน ใน SAPALDIA โดยใช้ Passive Sampler พบว่าปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสนั้นอยู่ระหว่างปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้านและนอกบ้านยกเว้นพื้นที่ที่มีไนโตรเจนไดออกไซด์ต่ำ ปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ภายนอกบ้านสูงมากขึ้นในฤดูหนาว ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสนั้นเท่าๆกันทุกฤดูกาล อีกทั้งพบว่าก๊าซที่ใช้ในการประกอบอาหารและการสูบบุหรี่เป็นปัจจัยในการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้านและไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสและปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสมีความสัมพันธ์กันสูงกับปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ภายในบ้าน

Kawamoto และคณะ (1997) ทำการศึกษาการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลกับแหล่งกำเนิดไนโตรเจนไดออกไซด์จากเครื่องทำความร้อนหลายๆประเภทและเตาประกอบอาหาร โดยศึกษาจากนักศึกษามหาวิทยาลัยจำนวน 85 คนโดยใช้ Filter badges ติดที่ปกเสื้อไว้ 1 อาทิตย์ และใช้อัตรา Hydroxyproline/creatinine (HOP/C) เป็นดัชนีบอกผลกระทบต่อสุขภาพ พบว่าการสูบบุหรี่และการใช้เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าไม่มีผลกระทบต่อการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลแต่การได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ของบุคคลจะเพิ่ม

ขึ้นตามระยะเวลาการใช้ kerosene heater หรือ oil fan heater อีกทั้ง การสูบบุหรี่และการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่มีผลต่อการเพิ่มของ Urinary HOP/C

Garret และคณะ (1999) ทำการศึกษาปริมาณ NO_2 , Formaldehyde , House dust mite allergen (Der p 1) และ Airborne fungal spore ในบ้านกับผลกระทบต่อสุขภาพใน LaTrobe Valley, Victoria ประเทศออสเตรเลีย โดยศึกษาในเด็กอายุ 7-14 ปีจากบ้าน 80 หลัง ทำการวิเคราะห์ผลต่อสุขภาพโดยใช้การทดสอบ Skin prick test และการตอบแบบสอบถาม พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์เฉลี่ยในบ้าน 6 ppb ด้วยช่วงค่าที่ bdl (below the detection) ถึง 125 ppb และยังพบว่าอาการทางระบบทางเดินหายใจในเด็กมีความสัมพันธ์กับทั้งระดับการได้รับสัมผัสไนโตรเจนไดออกไซด์และการมีเตาแก๊สภายในบ้าน

Garrett และคณะ (1999) ทำการศึกษาที่ Latrobe Valley victoria ประเทศออสเตรเลียเก็บตัวอย่าง NO_2 โดยใช้เครื่อง Passive Samplers ในบ้าน 80 หลัง โดยเก็บ 5 ครั้งใน 1 ปี พบว่าปริมาณของไนโตรเจนไดออกไซด์ ในบ้านจะมีปริมาณสูงมากกว่านอกบ้าน ส่วนในฤดูหนาวจะมีปริมาณสูงกว่าในทุกฤดู โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $<0.7-246$ ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตรและแหล่งใหญ่ของไนโตรเจนไดออกไซด์ มาจากเตาแก๊ส เครื่องทำความร้อนและการสูบบุหรี่ และพบว่า 67% ของการผันแปรของปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ในบ้านนั้นเนื่องมาจาก มีแหล่งไนโตรเจนไดออกไซด์หลักในบ้านโดยมีเตาแก๊สเป็นปัจจัยหลัก อายุบ้าน และระดับไนโตรเจนไดออกไซด์ นอกบ้าน

Keywood และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาระดับปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสโดยใช้ Fern-type samplers ในการศึกษาแบ่งกลุ่มเป้าหมายเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1. Beer, T. (บุคคลหนึ่งในผู้ร่วมทำการวิจัย) ระยะเวลา 22 อาทิตย์ กลุ่มที่ 2. กลุ่มเป้าหมายจำนวน 27 คน ระยะเวลา 1 อาทิตย์โดยกลุ่มที่ 1 ศึกษาในที่ทำงาน, คริว ,รถ และและภายนอกที่ทำงาน (เมือง Aspendale) ภายนอกบ้าน (เมือง Balwyn) พบว่า สถานที่ที่พบปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์มากที่สุดคือห้องคริว (22.4 ± 7.4 ppb) และน้อยที่สุดคือที่รถ (6.8 ± 1.6 ppb) ในขณะที่มีการเปรียบเทียบกันภายในกลุ่ม ที่ 2 พบว่ามีความคล้ายคลึงกันอันเนื่องมาจากมีกิจกรรมใกล้เคียงกัน

Fern และ Rodhe (1997) ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 , NO_2 และ NH_3 ในชนบทที่ห่างไกลความเจริญในเอเชียจำนวน 11 แห่ง (เกาะสี่ซังเป็น 1 ในนั้น) โดยใช้ Passive Sampler โดยทำการเปรียบเทียบกับโมเดล พบว่าในการเปรียบเทียบผลปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ได้จาก Passive Sampler และโมเดลโดยโมเดลที่ใช้ในการศึกษาใช้ global climatological chemical transport model (MOGUNTIA) นั้นพบว่าขัดแย้งกันระหว่างค่าที่ได้ทั้งนี้เนื่องมาจากปัจจัยอื่นเช่น รถยนต์

Chulalongkorn University Social Research Institute (1991) ทำการตรวจวัดมลสารภายในที่พักอาศัยในเขตชั้นในของกรุงเทพมหานคร โดยมลสารที่ทำการศึกษได้แก่ ฝุ่น PM-10, NO₂ และ CO เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของมลสารทั้ง 3 ชนิดในบ้านที่ใช้เตาถ่านและเตาแก๊สประกอบอาหารและวิเคราะห์ความแตกต่างของมลสารในบ้านที่ใช้เตาแก๊สประกอบอาหารกับความใกล้เคียงถนน พบว่าฝุ่น PM-10 ในบ้านที่ใช้เตาแก๊สมีค่ามากกว่าบ้านที่ใช้เตาถ่าน ปริมาณของไนโตรเจนไดออกไซด์ทั้งภายในและภายนอกบ้านที่ใช้เตาถ่านและเตาแก๊สที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกันคือ 16 ppb ส่วนปริมาณ CO นอกบ้านจะสูงกว่าในบ้านและในบ้านที่ใช้เตาถ่านและเตาแก๊สมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และความใกล้เคียง จากถนนหลักมีผลต่อปริมาณของมลสารไม่มากนัก ปริมาณของมลสารยังขึ้นอยู่กับภาวะอากาศระหว่างประกอบอาหาร

Panter และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการในการตรวจวัดไนโตรเจนไดออกไซด์ระหว่างวิธีการ Passive Sampling ด้วยอุปกรณ์แพสซีฟก๊าซแซมเปิล และวิธีการแบบ Active ด้วยเครื่องมือ Chemiluminescence Detector ที่เมือง Traralgon และเมือง Moe ใน Latrobe Valley โดยทำการตรวจวัด จำนวน 14 คู่ตัวอย่างระยะเวลาการตรวจวัด 7 วัน โดยใช้ two-side t-test เพื่อหาความแตกต่างระหว่าง 2 วิธี พบว่า ผลการศึกษาที่เมือง Traralgon ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธีการ Passive sampling และวิธีการแบบ Active มีค่าเท่ากับ 6.60 ± 1.57 และ 7.16 ± 1.44 ตามลำดับและแสดงค่า mean difference สำหรับทุกคู่ เท่ากับ 0.436 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า minimum significant mean difference ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.719 ที่ความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกันกับที่เมือง Moe พบปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธีการ Passive sampling และวิธีการแบบ Active มีค่าเท่ากับ 5.29 ± 1.67 และ 5.15 ± 1.89 ค่า mean difference สำหรับทุกคู่เท่ากับ 0.436 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า minimum significant mean difference ที่มีค่าเท่ากับ 0.935 ที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ที่พบระหว่างวิธีการในการตรวจวัดทั้ง 2 วิธีการสำหรับที่เมือง Traralgon และเมือง Moe ที่ความเชื่อมั่น 95%

Ayer และคณะ (1998) ทำการศึกษาระดับไนโตรเจนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศประเทศออสเตรเลียด้วย passive diffusion samplers ของ Ferm ในปี 1991 โดยใช้ระยะเวลาในการตรวจวัด 1-4 สัปดาห์พบว่าความเที่ยงตรงของ passive diffusion samplers แสดงได้จาก mean percentage difference ระหว่าง 2 คู่ตัวอย่างพบว่ามีค่าระหว่าง 5-10% สำหรับไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ทำการตรวจวัดไม่เกิน 15 ppbv และ 20-10% สำหรับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำการตรวจวัดระหว่าง 0.5-5 ppbv

Heal และคณะ (1999) ทำการศึกษาก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสโดยใช้ passive diffusion samplers ของ Ferm ในปี 1991 ในประเทศอังกฤษโดยทำการ

ศึกษาในระยะเวลาการตรวจวัด 2-3 วัน พบว่าให้ผลความเที่ยงตรงเท่ากับที่ทำการตรวจวัดในระยะเวลา 1 อาทิตย์จากค่าทางสถิติพบว่าการผันแปรของmean different ในระยะเวลาการตรวจวัด 2-3 วันน้อยกว่า 13% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า passive diffusion samplers ของ Ferm สามารถทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่บุคคลได้รับสัมผัสในระยะสั้นได้

Heal และคณะ (1999) จากการศึกษาเปรียบเทียบ passive diffusion tube (PDTs) ในการตรวจวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศในเมือง Edinburgh ประเทศอังกฤษระหว่าง standard PDTs Acrylic, foil-wrapped และ quartz tubes ในระยะเวลา 1 อาทิตย์และ 4 อาทิตย์ 3 จุดในเขตเมืองและทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแบบต่อเนื่องของไนโตรเจนไดออกไซด์ พบว่า acrylic PDTs มีนัยสำคัญที่ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีปริมาณมากกว่าปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จริงจาก chemiluminescence analyzer โดยเฉลี่ย 27 % จากการตรวจวัด 1 อาทิตย์และไม่พบความแตกต่างในการศึกษาระหว่าง standard PDTs และ foil-wrapped acrylic tube (กันรังสี UV ทั้ง 2 แบบ) อีกทั้งยังพบว่าอัตราค่าเฉลี่ยระหว่าง quartz tube (แสง UV ผ่านได้) และ chemiluminescence analyzer เท่ากับ 1.06 นอกจากนี้ quartz tube แสดงแนวโน้มในการเกิด photolysis เป็นการหักล้างปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ทำการตรวจวัดได้มากเกินไป เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการตรวจวัดพบว่าค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดเป็นระยะเวลา 4 อาทิตย์ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยที่ทำการตรวจวัด 1 อาทิตย์ เมื่อทำการศึกษาต่อไปพบว่าอัตราการลดลงของไนโตรเจนไดออกไซด์ขึ้นกับระยะเวลาซึ่งเป็นผลจากการเกิด photolysis