

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 มุลฝอยติดเชื้อ

#### 2.1.1 นิยามและลักษณะมุลฝอยติดเชื้อ

ตามกฎกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยการกำจัดมุลฝอยติดเชื้อ พ.ศ. 2545 “มุลฝอยที่มีเชื้อโรคปะปนอยู่ในปริมาณหรือมีความเข้มข้นซึ่งถ้ามีการสัมผัสหรือใกล้ชิดกับมุลฝอยนั้นแล้ว สามารถทำให้เกิดโรคได้ ซึ่งหมายรวมถึงมุลฝอยคงต่อไปนั้ที่เกิดขึ้นหรือใช้ในกระบวนการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์และการรักษาพยาบาล การให้ภูมิคุ้มกัน โรคและการทดลองเกี่ยวกับโรค การตรวจชันสูตรศพหรือซากสัตว์ รวมทั้งในการศึกษาวิจัยเรื่องดังกล่าว ให้ถือว่าเป็นมุลฝอยติดเชื้อด้วย” โดยมีลักษณะดังนี้

- ก. ซากหรือชิ้นส่วนอวัยวะของมนุษย์หรือสัตว์ ที่เป็นผลมาจากกิจกรรมทางการแพทย์ต่าง ๆ เช่น การผ่าตัด การตรวจชันสูตรศพ เป็นต้น
- ข. วัสดุมีคม ที่ใช้ในทางการแพทย์ต่าง ๆ เช่น เข็ม ใบมีด กระบอกฉีดยา เป็นต้น
- ค. วัสดุซึ่งสัมผัสหรือสงสัยว่าสัมผัสกับเลือด ส่วนประกอบของเลือด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเลือด สารคัดหลั่งจากร่างกายมนุษย์หรือสัตว์หรือวัคซีนที่ทำจากเชื้อโรคที่มีชีวิต เช่น สำลี ผ้ากอซ และท่อยาง เป็นต้น
- ง. มุลฝอยติดเชื้อทุกชนิดที่มาจากห้องรักษาผู้ป่วยติดเชื้อร้ายแรง

#### 2.1.2 ภาษาและวิธีการเก็บ รวบรวมมุลฝอยติดเชื้อ

ภาษาสำหรับบรรจุมุลฝอยติดเชื้อ ต้องมีสีแดงทึบแสง และมีข้อความสีดำที่สามารถอ่านได้ชัดเจนว่า “มุลฝอยติดเชื้อ” อยู่ภายใต้รูปหัวกระโหลกไขว้คู่กับตราสัญลักษณ์ที่ใช้ระหว่างประเทศ และต้องมีข้อความว่า “ห้ามนำกลับมาใช้อีก” และ “ห้ามเปิด” และควรมีลักษณะดังนี้คือ ก) มุลฝอยติดเชื้อประเภทของมีคม ควรบรรจุในภาษาณะที่เป็นกล่องหรือถัง ทำด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการแทงทะลุและการกัดกร่อนของสารเคมี มีฝาปิดมิดชิด และป้องกันการรั่วไหลของของเหลวภายในได้ สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยผู้ขนย้ายไม่มีการสัมผัสกับมุลฝอยติดเชื้อ ข) มุลฝอยติดเชื้อที่ไม่ใช่ประเภทวัสดุมีคม ควรบรรจุในถุงที่ทำจากพลาสติก หรือวัสดุอื่นที่มีความเหนียว ไม่ฉีกขาดได้ง่าย ทนทานต่อสารเคมีและการรับน้ำหนัก ถักน้ำได้ ไม่รั่วซึม และไม่ดูดซึม (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

ก่อนการเก็บรวบรวมมุลฝอยติดเชื้อ ต้องทำการคัดแยกมุลฝอยโดยการแยกทิ้ง ณ แหล่งกำเนิดมุลฝอยติดเชื้อ ห้ามเก็บมุลฝอยรวม ๆ กัน แล้วค่อยมาแยกประเภททีหลัง การเก็บรวบรวมมุลฝอยติดเชื้อควรกระทำดังนี้ 1) บรรจุมุลฝอยติดเชื้อไม่เกิน 3 ใน 4 ส่วนของความจุของภาษาณะบรรจุมุลฝอยติดเชื้อที่เป็นของมีคม และไม่เกิน 2 ใน 3 ส่วนของความจุของภาษาณะบรรจุมุล

ฝอยที่ไม่ใช้วัสดุมีคม 2) ปิดปากถุงให้แน่น โดยใช้เชือกมัด แล้วหีบจับเฉพาะบริเวณปากถุง นำไปวางไว้ ณ จุดพักขยะ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

### 2.1.3 การเคลื่อนย้ายมูลฝอยติดเชื้อ

การเคลื่อนย้ายมูลฝอยติดเชื้อ ควรใช้รถเข็นที่มีลักษณะดังนี้ 1) ทำด้วยวัสดุที่ทำความสะอาดง่าย ไม่มีแฉกมุม และสามารถทำความสะอาดด้วยน้ำได้ 2) มีพื้น ผนังทึบ และมีฝาปิดเพื่อป้องกันการรั่วซึม 3) มีข้อความสีแดง ที่มีขนาดสามารถมองเห็นชัดเจนอย่างน้อย 2 ด้านว่า “รถเข็นมูลฝอยติดเชื้อ ห้ามนำไปใช้ในกิจการอื่น” 4) มีรูระบายน้ำที่พื้น ซึ่งรูนี้จะเปิดเฉพาะเวลาทำความสะอาดรถเข็นเท่านั้น และ 5) ต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือสำหรับใช้เก็บมูลฝอยติดเชื้อที่ตกหล่นระหว่างการเคลื่อนย้ายและใช้สำหรับทำความสะอาดและฆ่าเชื้อบริเวณที่มูลฝอยติดเชื้อตกหล่น

ผู้ทำการเคลื่อนย้ายมูลฝอยติดเชื้อ ต้องมีความรู้เกี่ยวกับมูลฝอยติดเชื้อ โดยต้องผ่านการฝึกอบรมการป้องกันและระงับการแพร่เชื้อหรืออันตรายที่อาจเกิดจากมูลฝอยติดเชื้อ ทั้งนี้ ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางหนา ฝาปิดปากปิดจุก และรองเท้าพื้นยางหุ้มแข้งตลอดเวลาที่ปฏิบัติงาน การยกและจัดวางภาชนะบรรจุมูลฝอยติดเชื้อต้องทำอย่างถูกวิธี และเคลื่อนย้ายโดยรถเข็น ซึ่งมีเส้นทางเคลื่อนย้ายที่แน่นอน และในระหว่างทำการเคลื่อนย้าย ห้ามแหวะหรือหยุดพัก ณ ที่ใด กรณีมูลฝอยติดเชื้อตกหล่นหรือถุงแตกรั่วระหว่างการขนย้าย ต้องใช้คีมคีบหรือหีบด้วยถุงมือยางหนาแล้วเก็บมูลฝอยติดเชื้อหรือกระดากในภาชนะบรรจุมูลฝอยติดเชื้อใบใหม่ แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อก่อนเช็ดถูตามปกติ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

### 2.1.4 ที่พักรวมมูลฝอยติดเชื้อ

อาคารที่พักรวมมูลฝอยติดเชื้อ ควรมีลักษณะดังนี้ 1) ควรแยกเป็นสัดส่วนจากอาคารอื่น และควรอยู่ใกล้เตาเผาและระบบบำบัดน้ำเสีย 2) ควรมีขนาดเพียงพอที่จะรวบรวมมูลฝอยติดเชื้อได้อย่างน้อย 2 วัน 3) พื้น ผนัง เพดาน เรียบ ทำความสะอาดง่าย 4) มีรางหรือท่อระบายน้ำเสีย เชื่อมต่อกับระบบบำบัดน้ำเสีย มีลักษณะโปร่ง ไม่อับชื้น 5) มีการป้องกันสัตว์แมลงเข้าไป มีประตูกว้างพอสมควรและปิดด้วยกุญแจที่บุคคลทั่วไปไม่สามารถจะเข้าไปได้ 6) มีข้อความเป็นคำเตือน เห็นได้ชัดเจนว่า “ที่พักรวมมูลฝอยติดเชื้อ” ไว้ที่หน้าห้องหรือหน้าอาคาร และ 7) มีลานล้างรถเข็นใกล้ที่พักรวมมูลฝอยติดเชื้อและลานนั้นต้องมีท่อ รางหรือท่อรวบรวมน้ำเสียจากการล้างรถเข็นเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย

ทั้งนี้ต้องทำความสะอาด ชัดถู ที่พักรวมมูลฝอยติดเชื้อ โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นจุดหมักหมมเป็นประจำด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อโรค อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง สำหรับน้ำทิ้งที่ผ่านการล้างทำ

ความสะอาด ต้องผ่านลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ไม่ควรปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

## 2.2 การกำจัดมูลฝอยติดเชื้อด้วยวิธีการเผาในเตาเผา

การเผามูลฝอยติดเชื้อในเตาเผา (incineration) เป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานสากล ตามกฎกระทรวงสาธารณสุข ว่าด้วยการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อ (พ. ศ. 2545) สำหรับประเทศไทย วิธีนี้เป็นวิธีการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อที่แพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดปริมาณ และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมูลฝอย พร้อมการทำลายเชื้อโรคในมูลฝอย ทำให้ของเสียที่เหลือจากการเผาไหม้หรือเถ้าที่ต้องนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลมีปริมาณน้อยกว่าวิธีอื่นมาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและกำจัดขั้นสุดท้าย แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการเผามูลฝอยติดเชื้อในเตาเผานั้น มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้น้ำมันดีเซลในการเผาไหม้ ทำให้มีการปลดปล่อยมลภาวะอากาศสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งควรมีการตรวจสอบปริมาณความเข้มข้น เพื่อพิจารณาว่าสามารถปลดปล่อยมลภาวะอากาศดังกล่าวได้โดยตรงหรือจะต้องถูกบำบัดด้วยระบบบำบัดมลภาวะอากาศก่อน

### 2.2.1 หลักการเผาไหม้และการไหม้ในเตาเผา

การเผาไหม้เป็นกระบวนการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อทางเคมีโดยเปลี่ยนมูลฝอยให้เป็นเถ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วของสารอินทรีย์ในมูลฝอยติดเชื้อและเชื้อเพลิงได้เป็น ก๊าซ น้ำ และกากที่ไม่ไหม้ไฟ และให้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ ซึ่งสมการเคมีของการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1-2.2

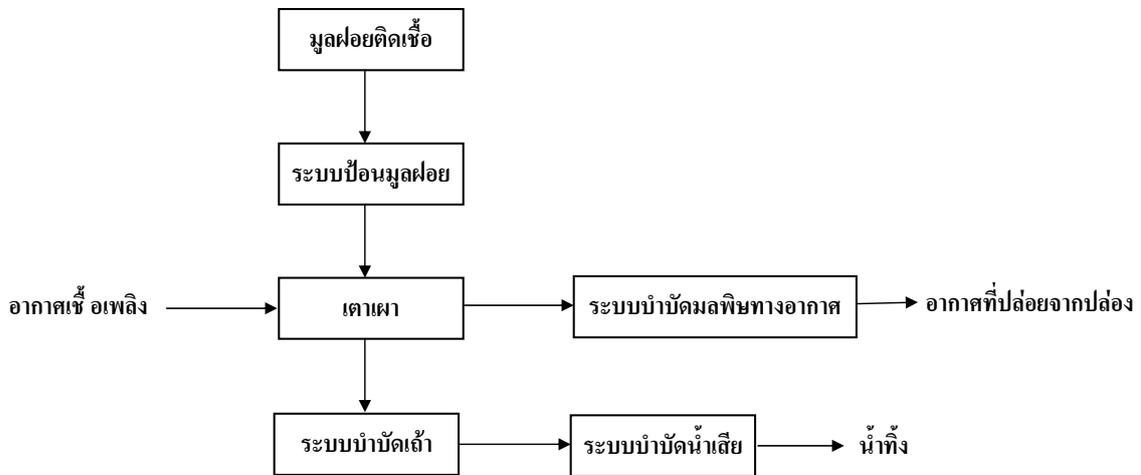


การเผาไหม้ในเตาเผามูลฝอยมีหลักการทำงานอยู่ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

- 1) ประเภทใช้อากาศมากเกินไป (Excess Air) เป็นการเผามูลฝอยที่ใช้หรือให้อากาศมากเกินไปกว่าปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี (Air Requirement) เหมาะสำหรับมูลฝอยที่ติดไฟได้ง่ายและไม่มีการเผาไหม้ที่รุนแรง หรือการเกิดระเบิดอย่างรุนแรง โดยทั่วไปการเผามูลฝอยชุมชนจะนิยมใช้เตาเผาประเภทนี้
- 2) ประเภทใช้อากาศน้อย (Starved Air) เป็นการเผามูลฝอยที่ใช้หรือให้อากาศน้อยกว่าอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี โดยนิยมเผามูลฝอยที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกันและลุกไหม้ได้ดี เช่น มูลฝอยอุตสาหกรรม

กระบวนการหลักในการกำจัดมูลฝอยด้วยการเผาประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้แก่ 1) กระบวนการป้อนมูลฝอยเข้าเตาเผา 2) กระบวนการเผามูลฝอยในเตา 3)

กระบวนการบำบัดมลภาวะอากาศจากเตาเผา 4) กระบวนการบำบัดน้ำเสีย และ 5) กระบวนการกำจัดเถ้า



รูปที่ 2.1 กระบวนการหลักในการบำบัดมลฝอยติดเชื้อด้วยการเผา (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

### 2.2.2 องค์ประกอบหลักของเตาเผาผลฝอยติดเชื้อ

องค์ประกอบหลักของเตาเผาผลฝอยติดเชื้อ สามารถสรุปโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้ (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

- 1) จุดรับมลฝอย เป็นจุดที่มลฝอยถูกนำเข้าสู่เตาเผา ซึ่งควรมีประตูปิดมิดชิดหลังนำมลฝอยเข้าเตาเผาแล้ว
- 2) ห้องเผา (Combustion Chamber) เป็นห้องที่มีการเผาไหม้มลฝอย อาจมีหนึ่งห้อง หรือมากกว่าหนึ่งห้อง สำหรับเตาเผาแบบหนึ่งห้องเผา มักเป็นเตาเผาขนาดเล็ก ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงไม่แนะนำให้ใช้ ส่วนเตาเผาแบบสองห้องเผา ต้องเป็นแบบไม่มีตะแกรงรองมูลฝอย เนื่องจากอาจมีมลฝอยแหลมคมและมลฝอยขนาดเล็กตกลงตะแกรงลงมา ทำให้ไม่ถูกเผาหรือทำลายเชื้อโรคได้ไม่สมบูรณ์
- 3) หัวเผา (Burner) เป็นจุดที่เชื้อเพลิงติดไฟเพื่อใช้ในการเผาไหม้มลฝอย ซึ่งที่หัวเผานี้จะเป็นจุดที่ทั้งเชื้อเพลิงและอากาศเข้ามาเพื่อการเผาไหม้
- 4) ระบบหมุนเวียนอากาศในห้องเผา มีไว้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และช่วยนำกระแสอากาศจากห้องเผาไหม้แรกไปยังเผาตัวอื่น ทั้งนี้ระบบหมุนเวียนอากาศอาจใช้การติดตั้งพัดลมระบายอากาศ หรืออาจจะเป็นช่องลมเล็ก ๆ เพื่อก่อให้เกิดการไหลเวียนของกระแสอากาศ
- 5) บ่อกักเก็บเถ้าและจุดนำเถ้าออก เป็นจุดที่เก็บเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้

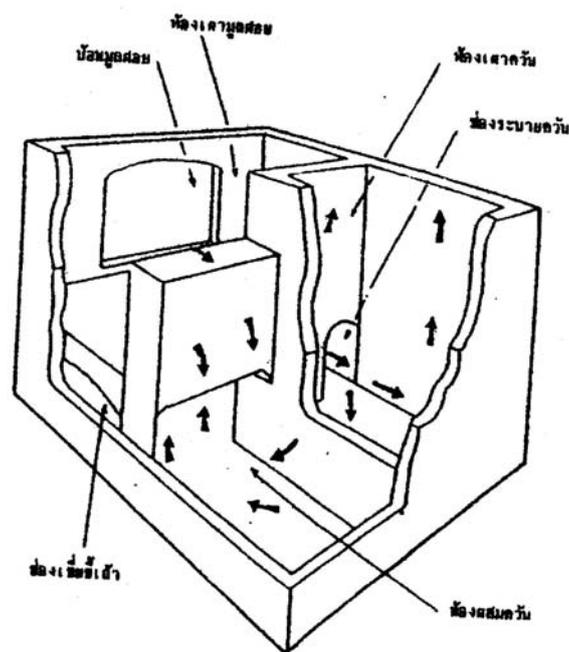
6) ปล่องระบายอากาศ เป็นปล่องระบายอากาศที่ผ่านการบำบัดมลภาวะอากาศแล้วออกสู่บรรยากาศ

### 2.2.3 ประเภทของเตาเผามูลฝอยติดเชื้อ

เตาเผามูลฝอยติดเชื้อที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ 1) เตาเผาหลายห้องเผา (Multi-chamber incinerator) 2) เตาเผาที่ใช้อากาศน้อย (starved-air incinerator หรือ Controlled air incinerator) และ 3) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln incinerator) ซึ่งหลักการทำงาน โดยทั่วไปของเตาเผาทั้งสามแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

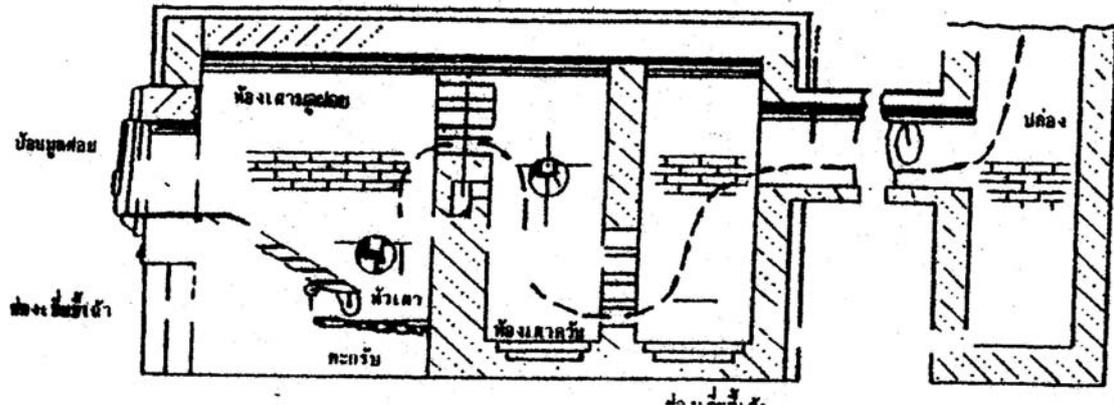
1) เตาเผาหลายห้องเผาแบบหลายห้องเผา (Multi-chamber incinerators) เตาเผาประเภทนี้มีห้องเผามากกว่าหนึ่งห้องเผา เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยเตาเผาประเภทนี้มักใช้อากาศในการเผาจำนวนมาก บางครั้งจึงเรียกว่า Excess air incinerator การทำงานของเตาเผาประเภทนี้ ห้องเผาแรกจะทำหน้าที่เผามูลฝอย และห้องเผาไหม้ที่สองจะใช้ในการเผาไหม้ก๊าซและอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งถูกขับออกมาจากห้องเผาแรก เตาเผาแบบนี้สามารถแบ่งออกตามลักษณะได้อีก 2 ชนิด คือ แบบ Retort และแบบ In-line

เตาเผาแบบ Retort จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งภายในมีช่องแบ่งหลาย ๆ ช่อง สำหรับทำหน้าที่บังคับการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้หักมุม 90° ทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของก๊าซ จะทำให้เขม่าและอนุภาคที่มากับก๊าซร้อนร่วงตกลงมา ดังแสดงในรูปที่ 2.2



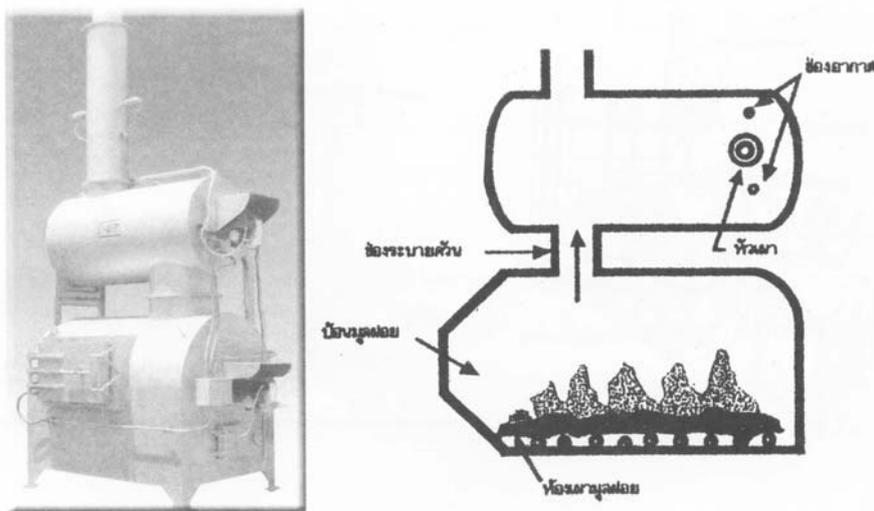
รูปที่ 2.2 เตาเผาหลายห้องเผาแบบหลายห้องเผา (Multiple Chamber Incinerator/Retort type) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

เตาเผาแบบ In-line จะมีขนาดใหญ่กว่าแบบ retort การไหลของก๊าซจากการเผาไหม้จะเป็นเส้นตรงในแนวแกนตลอดทั้งเตา โดยจะมีช่องแบ่งเพื่อให้ก๊าซเกิดการหักเหทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนเมื่อผ่านช่องแบ่งภายในเตาจะเป็นเช่นเดียวกับเตาเผาแบบ retort



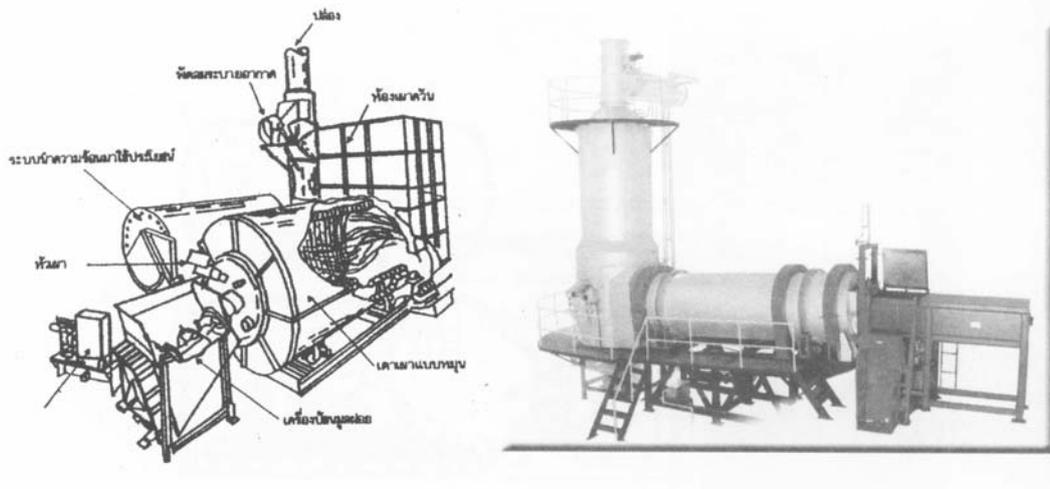
รูปที่ 2.3 เตาเผามูลฝอยแบบหลายห้องเผา (Multiple Chamber Incinerator/In-line type) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

2) เตาเผาประเภทใช้อากาศน้อย (Starved air หรือ Controlled air incinerators) มีการปรับปรุงมาจากเตาเผาแบบ Pyrolysis โดยเตาเผาแบบนี้จะมีห้องเผาไหม้สองห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มูลฝอยจะถูกส่งเข้ามายังห้องเผาไหม้แรก และเป่าอากาศเข้ามาทางด้านล่างของมูลฝอย ซึ่งอากาศที่ใช้มีปริมาณต่ำกว่าอากาศที่ต้องการใช้ตามทฤษฎีมาก อุณหภูมิของห้องเผาไหม้จะอยู่ในช่วง 760-850 องศาเซลเซียส อากาศอีกส่วนหนึ่งจะป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่สองซึ่งอยู่ด้านบน เพื่อทำการเผาไหม้สารระเหิดและสารแขวนลอยที่มาจากมูลฝอยในห้องเผาไหม้แรก โดยอุณหภูมิของห้องเผาไหม้จะอยู่ที่ประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ห้องเผาไหม้ต้องมีปริมาตรเพียงพอที่จะทำให้ก๊าซร้อนที่อยู่ในห้องเผาไหม้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.4 เตาเผาประเภทใช้อากาศน้อย (Starved-air หรือ Controlled air incinerator) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

3) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln incinerators) เตาเผาแบบนี้มีห้องเผา 2 ห้อง โดยห้องแรกมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่วางในแนวนอนและทำมุมเอียงกับพื้นในลักษณะที่บริเวณต้นห้องที่ป้อนมูลฝอยเข้ามามีระดับสูงกว่าตอนท้ายห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ห้องเผาแรกนี้สามารถหมุนได้ ทำให้มีความปั่นป่วนในเตาสูง การเผาไหม้มีประสิทธิภาพดีและความเอียงของเตาช่วยทำให้เถ้าที่เหลือจากการเผาถูกลำเลียงออกทางด้านท้ายเตาเผาได้ง่าย การเผาไหม้จะใช้อากาศมากเกินพอ เช่นเดียวกับเตาเผาแบบหลายห้องเผา ส่วนห้องเผาที่สองเป็นห้องเผาวันที่เกิดจากการเผาไหม้ในห้องเผาแรก เพื่อลดปัญหามลภาวะอากาศ อย่างไรก็ตามเตาเผาประเภทนี้ก่อให้เกิดฝุ่นในปริมาณมาก จึงควรมีระบบบำบัดมลภาวะอากาศก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2.5 เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln incinerator) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

#### 2.2.4 มลภาวะอากาศจากเตาเผามูลฝอยติดเชื้อ

เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) จะรวมตัวกับออกซิเจน ( $O_2$ ) จากอากาศเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และไอน้ำ ( $H_2O$ ) แต่ถ้าเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเขม่าควัน (particulate matter) ขึ้นแทนที่ สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) จะเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และไนโตรเจนที่อยู่ในมูลฝอย และหากมีสารคลอรีนเข้ามาในกระบวนการเผาไหม้ จะเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และก๊าซคลอรีน ( $Cl_2$ ) ซึ่งจะถูกปล่อยออกจากห้องเผาในสถานะไอ แต่ถ้ามีอัตราส่วนของ H:Cl ต่ำ จะไม่เกิดก๊าซคลอรีน ส่วนซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในมูลฝอยจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ซึ่งปริมาณที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในมูลฝอย (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2546)

### 2.3 อุดมวิทยากับการแพร่กระจายมลภาวะอากาศ

เมื่อมลภาวะอากาศถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดจะกระจายได้มากน้อยและจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อชุมชนอย่างไร ขึ้นกับสภาพทางอุตุนิยมวิทยา เช่นความเร็วลม ทิศทางลม รวมทั้งสภาพการคงตัวของอากาศ (Stability Condition) ถ้าเกิดกรณีสภาวะบรรยากาศเลวร้าย (Worst Case Condition) และมลภาวะอากาศปล่อยออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่มากพอ อาจเอื้อให้เกิดผลกระทบต่อชุมชนบริเวณใกล้เคียงได้ ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

**ก. ทิศทางลม (Wind Direction)** ลมเป็นตัวแปรที่สำคัญมากอย่างหนึ่งต่อการแพร่กระจายของมลภาวะอากาศ ซึ่งชุมชนที่อยู่ในทิศทางใต้ลมมักจะได้รับผลกระทบจากการปล่อยมลภาวะอากาศจากแหล่งกำเนิดเสมอ โดยส่วนใหญ่แล้วลมของประเทศไทยนั้นประกอบด้วย ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นลมที่พัดพาความชื้นจากทะเลขึ้นสู่แผ่นดินและมักมีโอกาสมากให้เกิดฝนตกได้มากในช่วงฤดูฝนส่วนลมอีกฤดูหนึ่งคือ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะพัดเอาความเย็นจากทางตอนเหนือของประเทศลงมาทางด้านล่างของประเทศ

**ข. ความเร็วลม (Wind Speed)** จะมีอิทธิพลค่อนข้างมากต่อการแพร่กระจายของสารมลภาวะอากาศ ธรรมชาติของความเร็วลมนั้นในพื้นที่เดียวกันแต่ที่ระดับความสูงที่แตกต่างกันจะให้ค่าความเร็วแตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถคำนวณความเร็วของลมที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน (Wind Profile) ได้โดยใช้ Power Law Relationship

**ค. อุณหภูมิ (Temperature)** อุณหภูมิของบรรยากาศจะมีผลต่อการแพร่กระจายของสารมลภาวะอากาศที่ปล่อยออกจากปล่อง ถ้าหากบรรยากาศภายนอกมีอุณหภูมิที่แตกต่างกว่าอากาศที่ปล่อยออกจากปล่อง ย่อมก่อให้เกิดการกระจายตัวที่แตกต่างกันด้วย

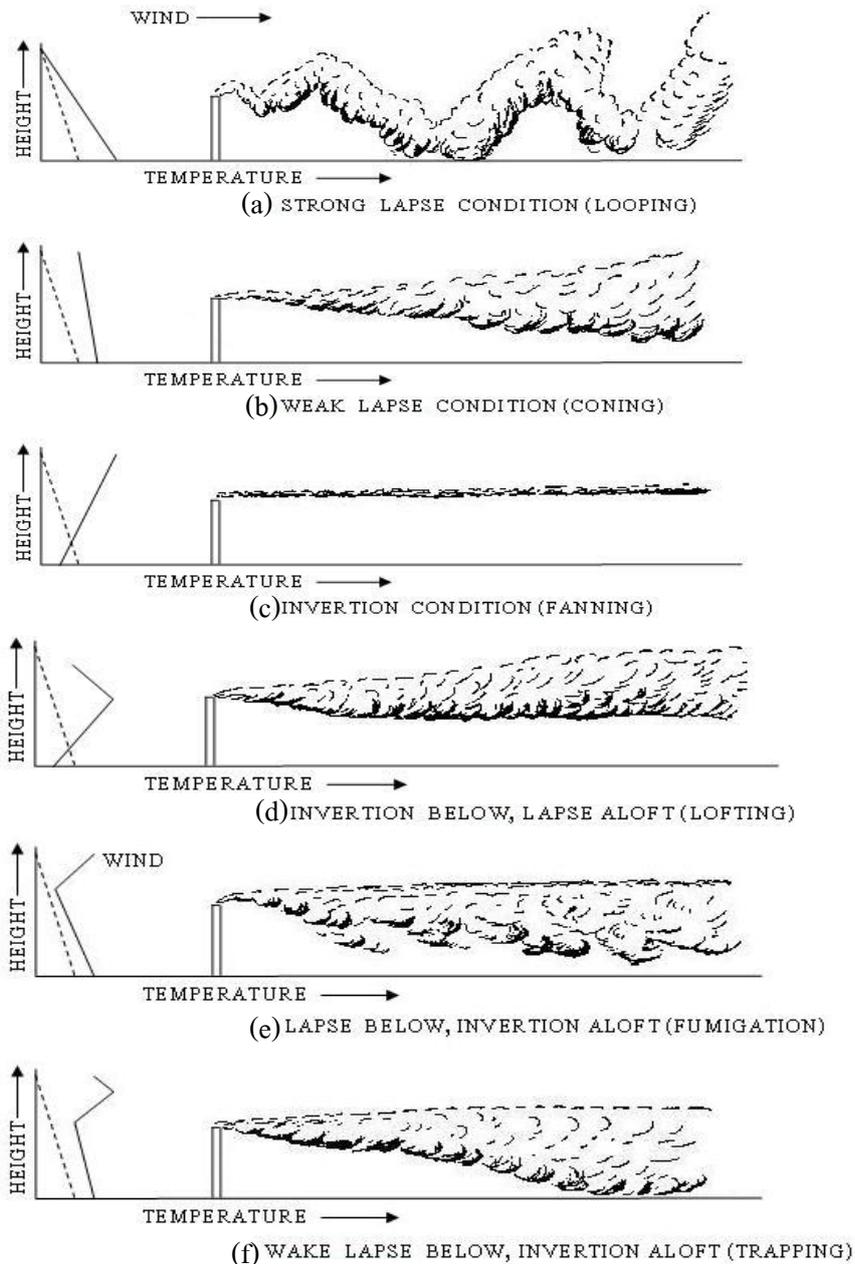
**ง. สภาพความเสถียรของบรรยากาศ (Stability Condition)** สภาพของบรรยากาศที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของมลภาวะอากาศ ซึ่งความเสถียรของบรรยากาศนี้มีอิทธิพลค่อนข้างมากกว่าพารามิเตอร์อื่นๆ ผลกระทบทางอากาศที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมจะกระจายตัว หรือเจือจางได้มากน้อยขึ้นกับสภาพความเสถียรของบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่

#### 2.3.1 การแพร่กระจายของมลภาวะอากาศในบรรยากาศ

มลภาวะอากาศที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดอาจเป็นช่วง ๆ ในรูปของพัฟฟ์ (Puff) หรือออกมาแบบต่อเนื่องในรูปของพวย (Plume) โดยแหล่งกำเนิดนี้อาจเป็นแบบจุด แบบเส้น หรือแบบพื้นที่ อาจอยู่ที่ระดับพื้นดินหรือระดับปล่องควันซึ่งอยู่เหนือพื้นดิน ขณะที่พวยเคลื่อนที่ตามลม มันจะขยายขนาดออกเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดจากกระแสวน (eddies) (วงศ์พันธ์ ลิปเสนีย์ และคณะ, 2536)

ความเข้มข้นของมวลสารกระจายในทิศทางตั้งฉากกับแกนของลมทั้งแนวตั้งและแนวนอนเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ความเข้มข้นของมวลสารที่จุดใด ๆ ภายในพวยจะขึ้นอยู่กับ

ระยะเวลา ทั้งนี้พุ่มจะกระจายมากขึ้นเนื่องจากขนาดของกระแสนซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลา หมายความว่าจำเป็นต้องใช้ช่วงเวลาต่าง ๆ กันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพุ่มกับระยะทางตาม ลม หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าอัตราการกระจายของพุ่ม ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับความแปรปรวนและ ขนาดกระจายของกระแสนเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของพุ่มด้วย ซึ่งขนาดของพุ่มนี้ขึ้นอยู่กับ เวลาเดินทางจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของพุ่มที่ออกจากปล่อง (Turner, 1969)

จากรูปที่ 2.6 เป็นรูปแสดงการแพร่กระจายของพุ่มที่ความเสถียรของบรรยากาศต่าง ๆ กัน โดยที่ (วงศ์พันธ์ ลิปเสนีย์ และคณะ, 2536)

(a) Looping เกิดเมื่อ lapse rate ของบรรยากาศเป็นแบบ superadiabatic และอากาศมีความปั่นป่วนมาก ซึ่งเกิดในฤดูร้อนท้องฟ้าแจ่มใสและโลกได้รับแสงอาทิตย์เป็นปริมาณมาก ก่อให้เกิดความแปรปรวนทางความร้อน ซึ่งทำให้เกิดกระแสนขนาดใหญ่ ทำให้พุ่มกระจายโดยเร็ว

(b) Coning เกิดเมื่อ lapse rate ของบรรยากาศเป็นแบบ subadiabatic พุ่มจะมีรูปเหมือนกรวย และการกระจายจะช้ากว่าแบบ Looping จะเกิดเมื่อบรรยากาศครึ้มฟ้าครึ้มฝน หรือในเวลากลางคืนและมีความเร็วลมปานกลาง

(c) Fanning เกิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบ inversion ทั้งด้านบนและด้านล่างของพุ่มตลอดความสูง การกระจายทางแนวดิ่งจะมึ้น้อยมาก เพราะอากาศอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง แม้ว่า Fanning จะไม่ทำให้ปริมาณมลภาวะอากาศที่พื้นดินมีค่าสูงก็ตาม แต่อาจเกิดเป็น Fumigation ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาได้

(d) Lofting เกิดเมื่อมี inversion เฉพาะด้านล่างของพุ่ม ทำให้ไม่มีการผสมทางด้านล่าง ซึ่งมักจะเกิดในเวลาเย็นเมื่อมี radiative inversion ที่ระดับพื้นดินเกิดขึ้น และความสูงของปล่องไฟสูงกว่าระดับ inversion แต่ถ้าระดับ inversion สูงขึ้นจนผ่านระดับปล่องไฟ การกระจายของพุ่มจะเปลี่ยนจากแบบ Lofting เป็นแบบ Fanning

(e) Fumigation เกิดเมื่อมี inversion ทางด้านบนของพุ่ม หรืออาจเกิดการสลายตัวของ inversion ที่ระดับพื้นดิน หรือเกิดจากลมบกลมทะเล

(f) Trapping เกิดเมื่อพุ่มถูกกักไว้ระหว่าง inversion ทำให้การกระจายในช่วงแนวดิ่งมีจำกัด Fanning ต่างจาก Trapping ตรงที่ไม่มีช่วงกระจายทางแนวดิ่ง

ดังนั้นในการทำนายการแพร่กระจายของมลภาวะอากาศจึงต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จะต้องอาศัยตัวแปรหลายอย่าง เพื่อพิจารณาการแพร่กระจายของพุ่มตามลักษณะของภูมิอากาศ ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

### 2.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือชุดของสมการที่ใช้ทำนายความเข้มข้นของมลภาวะอากาศที่กระจายจากแหล่งกำเนิด โดยส่วนสำคัญที่ทำให้ใช้แบบจำลองง่ายขึ้น คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประยุกต์มาจากชุดของสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ในการดำเนินงานซึ่งเรียกว่าข้อมูลป้อนเข้าดังนี้ (วรารุช เสือดี, 2546)

### 2.3.3 ข้อมูลป้อนเข้า (Input)

ข้อมูลป้อนเข้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการดำเนินงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณความเข้มข้นของสารมลภาวะอากาศ โดยทั่วไปประกอบด้วย

ก. แหล่งกำเนิดมลภาวะอากาศ แบ่งออกเป็น แหล่งกำเนิดที่สามารถบอกตำแหน่งได้แน่นอนหรือแหล่งกำเนิดเฉพาะตำแหน่ง (Point Source) เช่น ปล่องควันในโรงงานอุตสาหกรรม เตาเผาขยะ เป็นต้น แหล่งกำเนิดแบบพื้นที่ (Area Source) เช่น การจราจร เป็นต้น การหาอัตราการปล่อยสารมลภาวะอากาศจากแหล่งกำเนิดสามารถทำได้ ทั้งจากการตรวจวัดจริง และการคำนวณ โดยอาศัยค่าปัจจัยการปล่อยสารพิษทางอากาศ (Emission Factor)

ข. ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประเมินผลกระทบเนื่องจากมลภาวะอากาศ จำเป็นจะต้องทราบสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา เพื่อให้การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของสารมลภาวะอากาศเป็นไปอย่างถูกต้อง โดยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาสำหรับแบบจำลองทั่วไป ได้แก่ ความเร็วลม ทิศทางลม ความสูงของชั้นเมฆบนท้องฟ้า เป็นต้น

ค. ผู้รับผลกระทบจากมลภาวะอากาศ การศึกษาด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตำแหน่งของผู้รับมลภาวะอากาศเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะทำให้ทราบผลกระทบได้อย่างถูกต้องโดยข้อมูลที่สำคัญคือพิกัด ตำแหน่งและความสูงของผู้รับผลกระทบเหนือระดับน้ำทะเล นอกจากนี้ยังมีจุดที่อ่อนไหวซึ่งอาจ เป็นวัด โรงเรียน ชุมชน หรือสถานที่ที่ต้องการควบคุมมลพิษเป็นพิเศษ และเพื่อให้ง่ายในการนำเสนอผลที่ได้จะต้องใช้แผนที่บอกตำแหน่งบริเวณครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดที่ต้องการศึกษา เช่น แผนที่ 1 ต่อ 100,000

ง. ลักษณะพื้นที่ที่ทำการศึกษา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปต้องการลักษณะภูมิประเทศบริเวณที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ความสูงของพื้นที่ที่ทำการศึกษา ขอบเขตที่ทำการศึกษา เป็นต้น

### 2.3.4 ผลที่ได้จากการดำเนินงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลที่ได้จากการดำเนินงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือข้อมูลออก จะได้เป็นความเข้มข้นของสารมลภาวะอากาศที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปที่ใช้ในการประเมินผลกระทบทางอากาศนั้น มักจะใช้พื้นฐานของแบบจำลองเกาส์เซียน ซึ่งความละเอียดของการศึกษาขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น แบบจำลองฯ ISC, VALLEY, SCREEN3, AERMOD เป็นต้น ซึ่งเหมาะกับการศึกษาแหล่งกำเนิดที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองฯ HIWAY2 หรือแบบจำลองฯ CALINE4 ใช้สำหรับประเมินผลกระทบมลภาวะอากาศจากการจราจร ซึ่งเป็นการประเมินในกรณีที่ผู้รับผลกระทบอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดสารพิษ โดยส่วนใหญ่แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ที่ใช้ในประเทศไทยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม  
ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA)

### 2.3.5 แบบจำลอง Gaussian Model

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายความเข้มข้นตามทิศทางลมจากจุดกำเนิดจุดหนึ่ง มี  
หลายแบบ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Gaussian นี้เป็นแบบจำลองที่มีสูตรชัดเจน และมี  
ข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับการแพร่กระจายทำให้ใช้ง่าย และมีความถูกต้องสูง สมการพื้นฐานของ  
Gaussian ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.3 (วรารุช เสือดี, 2546)

$$\chi(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.3)$$

โดยที่  $(x, y, z)$  = จุดพิกัดของแหล่งกำเนิด และจุดรับ (m)

$x$  = ค่าความเข้มข้นที่จุดรับ ที่ต้องการคำนวณหา ( $g/m^3$ )

$Q$  = อัตราการปล่อยมลภาวะอากาศจากแหล่งกำเนิด ( $g/s$ )

$H$  = ความสูงประสิทธิของปล่องควัน (m)

$U$  = ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)

$\sigma_y$  = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวราบ (m)

$\sigma_z$  = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้ง (m)

ทั้งนี้การคำนวณทำได้ทีละทิศทางลมเท่านั้น โดยให้ทิศทางลมไปในแนวแกน  $x$  เสมอ

สำหรับค่า  $\sigma_y$  กับ  $\sigma_z$  นั้น สามารถดูได้จากรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ เมื่อทราบค่าความเสถียร  
ของบรรยากาศ (เป็นตัวอักษร A-F) ซึ่งสามารถอ่านได้จากตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ความเสถียรของบรรยากาศตามแบบของ Pasquill-Gifford (Turner, 1969)

ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตร/วินาที)	ช่วงเวลา				
	กลางวัน(ปริมาณแสงอาทิตย์)		กลางคืน(ปริมาณเมฆในท้องฟ้า)		
ที่ความสูง 10 เมตร	มาก	ปานกลาง	น้อย	มากกว่าครึ่ง	น้อยกว่าครึ่ง
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

หมายเหตุ

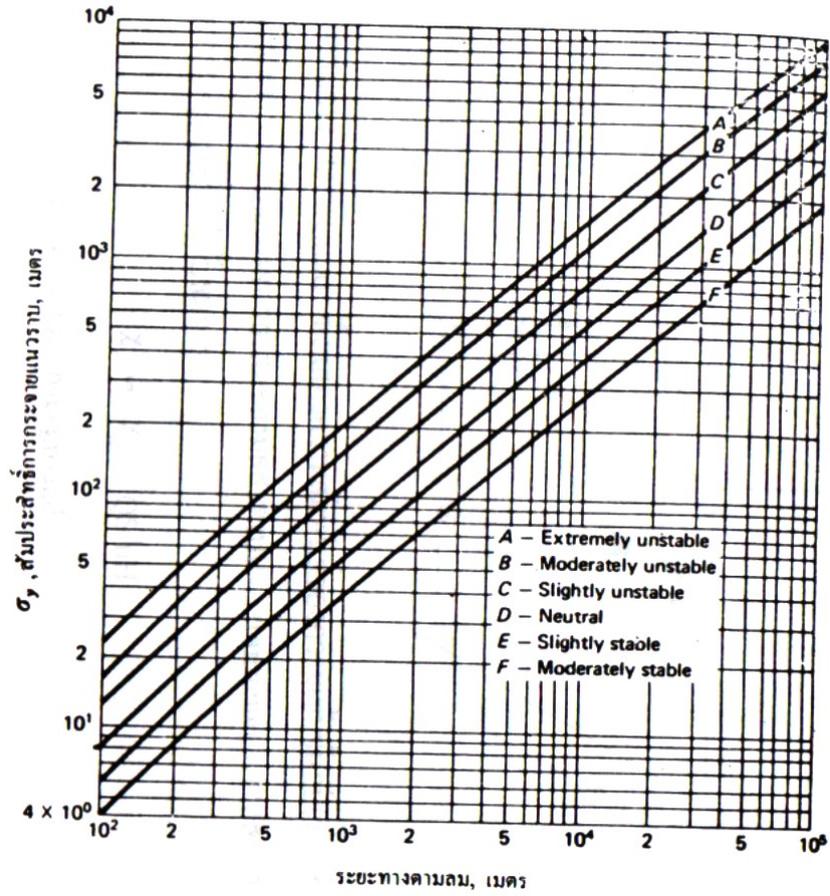
- (1) คำว่า “กลางคืน” ให้หมายถึง ช่วงเวลารวมถึงหนึ่งชั่วโมงก่อนพระอาทิตย์ตกและหนึ่งชั่วโมงหลังจากพระอาทิตย์ขึ้น
- (2) คำว่า “แสงอาทิตย์มาก” คือ องศาพระอาทิตย์มากกว่า 60°
- (3) คำว่า “แสงอาทิตย์ปานกลาง” คือ องศาพระอาทิตย์ระหว่าง 35°-60°
- (4) คำว่า “แสงอาทิตย์น้อย” คือ องศาพระอาทิตย์ระหว่าง 15°-35°
- (5) ความคงตัวของบรรยากาศแบบ D (Neutral) เกิดขึ้นเมื่อฟ้าครึ้มทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน

ความเสถียรระดับ A และ B เทียบเท่า Very unstable

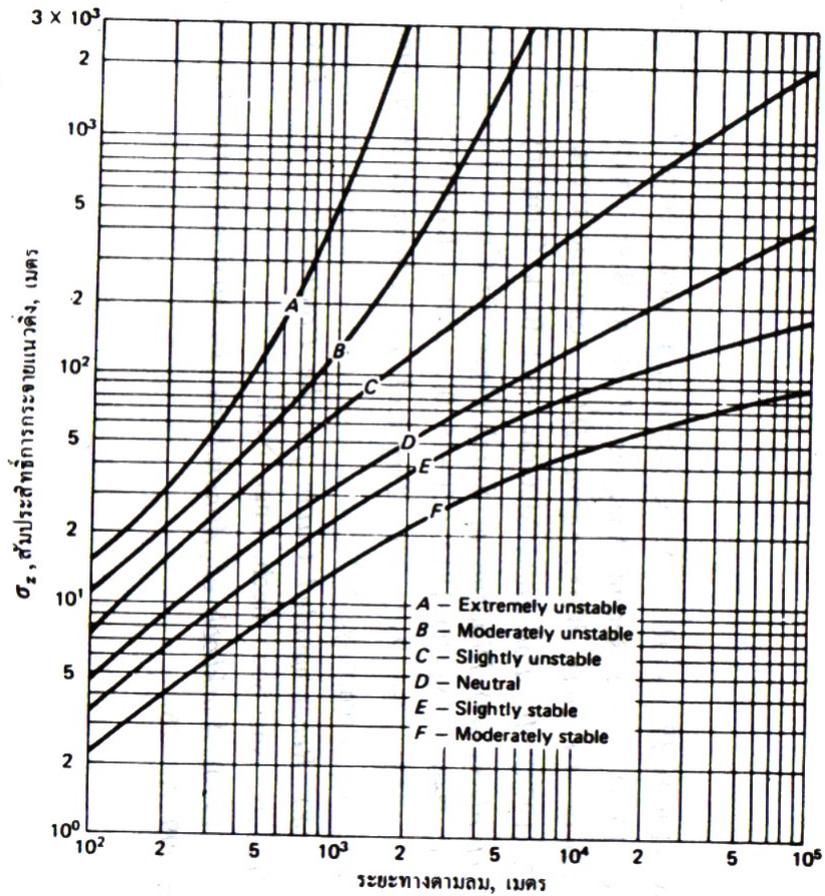
ความเสถียรระดับ C เทียบเท่า Unstable

ความเสถียรระดับ D เทียบเท่า Neutral

ความเสถียรระดับ E และ F เทียบเท่า Stable



รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน Y (Turner, 1969)



รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน Z (Turner, 1969)

การลอยตัวขึ้นของพุ่ม Plume rise ใช้คำนวณหาความสูงประสิทธิ์ของปล่องควัน โดยทั่วไปนิยมใช้วิธี Holland ใน Turner (1969) คือ

$$\Delta H = \frac{V_s d}{u} \left( 1.5 + 2.67 \times 10^{-3} P \left[ \frac{T_s - T_a}{T_s} \right] d \right) \quad (2.4)$$

หรือวิธีของ Briggs คือ

$$\Delta H = \frac{1.6}{u} \left[ g V_s \left( \frac{d^2}{4} \right) \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right]^{1/3} X^{2/3} \quad (2.5)$$

เมื่อ

- $V_s$  = ความเร็วลมในปล่อง (m/s)
- $u$  = ความเร็วลมภายนอกทั่วไป (m/s)
- $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของปล่อง (m)
- $p$  = ความดันอากาศเป็นมิลลิบาร์

- $T_s$  = อุณหภูมิอากาศในปล่อง (K)
- $T_a$  = อุณหภูมิอากาศภายนอกทั่วไป (K)
- $X$  = ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด (m)
- $\Delta H$  = Plume rise (m)

ข้อจำกัดของแบบจำลองแบบ Gaussian ได้แก่ (แสงสันต์, 2536)

- ความเร็วและทิศทางลมต้องคงที่
- ใช้ได้ดีในช่วงระยะทาง 100-2,000 เมตร จากแหล่งกำเนิด
- มลภาวะอากาศจากแหล่งกำเนิดจะต้องลอยขึ้นจนถึงจุดสมดุลแล้วพัดไปตามทิศทางลม โดยรักษาระดับความสูงที่จุดสมดุลนั้นคงที่ตลอด หรือตกลงสู่พื้นดิน หากกระทบพื้นดินต้องมากกว่า 10 นาทีขึ้นไป
- มลภาวะอากาศต้องไม่เปลี่ยนแปลง หรือตกลงสู่พื้นดิน หากกระทบพื้นดินต้องสะท้อนกลับหมด
- แหล่งกำเนิดมลภาวะอากาศและสภาพทางอุตุนิยมวิทยาต้องคงที่เสมอ เพราะแบบจำลองนี้เป็นแบบ Steady state ในช่วงเวลาที่คำนวณ หากไม่คงที่ ต้องแบ่งเป็นช่วงๆ ที่คงที่แล้วคำนวณเป็นช่วงๆ ไป

### 2.3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ AERMOD (สรณ์ สุวรรณโชติ, 2548)

โดยส่วนใหญ่คุณภาพอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการแพร่กระจายของมลภาวะอากาศใน Planetary Boundary Layer (PBL) ซึ่งหมายถึงชั้นบรรยากาศที่อยู่ติดกับผิวโลก ซึ่งได้รับอิทธิพลจากผิวโลก มีช่วงตั้งแต่ประมาณ 100 เมตร ในตอนกลางคืน ถึง 1-2 กิโลเมตร ในตอนกลางวัน โดยแบ่งออกเป็น Convective Boundary Layer (CBL) ซึ่งหมายถึงชั้นที่บรรยากาศเกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเนื่องมาจากการพาความร้อน (Sensible Heat Flux, H) และ Stable Boundary Layer (SBL) ซึ่งหมายถึงชั้นบรรยากาศที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการพาความร้อน โดยจะได้รับเฉพาะผลของแรงเสียดทานจากผิวโลก

AERMOD เป็น steady-state plume โดยใน SBL จะสมมุติว่ามีการแพร่กระจายความเข้มข้นแบบ Gaussian ทั้งแนวตั้งและแนวราบ ส่วนใน CBL มีการแพร่กระจายความเข้มข้นแบบ Gaussian ในแนวราบ แต่ในแนวตั้งจะมีการแพร่กระจายแบบ bi-Gaussian probability density function (pdf)

ระบบของแบบจำลอง AERMOD ประกอบด้วยกระบวนการในการเตรียมข้อมูลนำเข้า 2 กระบวนการคือ

- ก. AERMET ใช้ในการเตรียมข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และคำนวณพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศที่อยู่ติดกับผิวโลก ที่แบบจำลอง AERMOD ต้องการ

ข. AERMAP ใช้เตรียมลักษณะของพื้นที่และตำแหน่งของผู้รับ

### 2.3.7 ข้อมูลการนำเข้า AERMET

ข้อมูลพื้นฐานที่ต้องนำเข้าใน AERMET

ก. ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา : ความเร็วลม, ทิศทางลม, ปริมาณเมฆปกคลุม, และอุณหภูมิ เนื่องจากกรมอุตุนิยมวิทยาทำการตรวจวัดข้อมูลทุก ๆ 3 ชั่วโมง แต่ความต้องการของแบบจำลองเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ดังนั้นต้องหาค่าชั่วโมงที่ขาดหายไป (Missing Data) เช่น มีข้อมูลชั่วโมงที่ 1 และ 4 ต้องการหาข้อมูลในช่วงชั่วโมงที่ 2 และ 3 ใช้กับข้อมูลทั้งหมดยกเว้นทิศทางลมให้คำนวณดังนี้ (วารสาร เสือดี, 2544)

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 2} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) + (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 4} - \text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1})/3$$

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 3} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) + (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 4} - \text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) \times 2/3$$

สำหรับทิศทางลม ถ้าข้อมูลชั่วโมงที่ 1 กับข้อมูลชั่วโมงที่ 4 มีค่าแตกต่างกันมากกว่า 90 องศาแล้วจะได้

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 2} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1})$$

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 3} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 4})$$

ถ้าข้อมูลชั่วโมงที่ 1 กับข้อมูลชั่วโมงที่ 4 มีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 90 องศาแล้วจะได้

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 2} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) + (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 4} - \text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1})/3$$

$$\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 3} = (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) + (\text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 4} - \text{ข้อมูลชั่วโมงที่ 1}) \times 2/3$$

ข. ลักษณะผิวพื้น : Albedo ( $\alpha$ ), Bowen ratio ( $B_o$ ), Surface Roughness length ( $Z_o$ )

Albedo คือการสะท้อนของรังสี (solar radiation) จากพื้นผิวกลับสู่บรรยากาศ โดยไม่มีการดูดซับ มีค่าระหว่าง 0.1 สำหรับพื้นที่ที่เป็นป่าผลัดใบ (deciduous forest) ถึง 0.9 สำหรับช่วงหิมะตกใหม่ ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

Bowen ratio คือ ดัชนีความชื้นที่ผิว เป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความร้อน (sensible heat flux) ใช้เพื่อพิจารณาพารามิเตอร์สำหรับสภาวะที่เกิดการพา (convective condition) ใน PBL ซึ่ง ณ เวลาเที่ยงวัน Bowen ratio มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ที่เหนือผิวน้ำ ถึง 10.0 ที่เหนือทะเลทราย ดังแสดงในตารางที่ 2.3-2.5

Surface Roughness length คือความสูงที่ความเร็วลมเฉลี่ยในแนวระดับเป็น 0 มีค่าอยู่ในช่วงน้อยมากกว่า 0.001 เมตร เหนือผิวน้ำทะเลที่สงบ ถึง 1 เมตร หรือมากกว่าที่เหนือพื้นป่าหรือพื้นที่เขตเมือง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.2 ค่า Albedo แบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและฤดูกาล

(ALBEDO OF COVERS BY LAND-USE AND SEASON)

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)	ฤดูใบไม้ผลิ (Spring)	ฤดูร้อน (Summer)	ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn)	ฤดูหนาว (Winter)
แหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำทะเล (Fresh water and sea)	0.12	0.10	0.14	0.20
ป่าไม้ผลัดใบ (Deciduous Forest)	0.12	0.12	0.12	0.50
ป่าสน (Coniferous Forest)	0.12	0.12	0.12	0.35
หนองน้ำ บึง (Swamp)	0.12	0.14	0.16	0.30
พื้นที่การเกษตร (Cultivated Land)	0.14	0.20	0.18	0.60
ทุ่งหญ้า (Grassland)	0.18	0.18	0.20	0.60
เขตพื้นที่เมือง (Urban)	0.14	0.16	0.18	0.35
พื้นที่ทะเลทราย (Desert Shrubland)	0.30	0.28	0.28	0.45

ที่มา : Revised Draft User's Guide For The Aermoc Meteorological Preprocessor (AERMET)

(1998, น.4-51)

ตารางที่ 2.3 ค่า Bowen ratio แบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและฤดูกาล

(DAYTIME BOWEN RATIO BY LAND-USE AND SEASON DRY CONDITIONS)

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)	ฤดูใบไม้ผลิ (Spring)	ฤดูร้อน (Summer)	ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn)	ฤดูหนาว (Winter)
แหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำทะเล (Fresh water and sea)	0.1	0.1	0.1	0.2
ป่าไม้ผลัดใบ (Deciduous Forest)	1.5	0.6	2.0	2.0
ป่าสน (Coniferous Forest)	1.5	0.6	1.5	2.0
หนองน้ำ บึง (Swamp)	0.2	0.2	0.2	2.0
พื้นที่การเกษตร (Cultivated Land)	1.0	1.5	2.0	2.0
ทุ่งหญ้า (Grassland)	1.0	2.0	2.0	2.0
เขตพื้นที่เมือง (Urban)	2.0	4.0	4.0	2.0
พื้นที่ทะเลทราย (Desert Shrubland)	5.0	6.0	10.0	10.0

ที่มา : Revised Draft User's Guide For The Aermoc Meteorological Preprocessor (AERMET)

(1998, น.4-52)

ตารางที่ 2.4 ค่า Bowen ratio แบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและฤดูกาล ในสภาวะที่มีความชื้นปกติ (DAYTIME BOWEN RATIO BY LAND-USE AND SEASON AVERAGE MOISTURE CONDITIONS)

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)	ฤดูใบไม้ผลิ (Spring)	ฤดูร้อน (Summer)	ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn)	ฤดูหนาว (Winter)
แหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำทะเล (Fresh water and sea)	0.1	0.1	0.1	1.5
ป่าไม้ผลัดใบ (Deciduous Forest)	0.7	0.3	1.0	1.5
ป่าสน (Coniferous Forest)	0.7	0.3	0.8	1.5
หนองน้ำ บึง (Swamp)	0.1	0.1	0.1	1.5
พื้นที่การเกษตร (Cultivated Land)	0.3	0.5	0.7	1.5
ทุ่งหญ้า (Grassland)	0.4	0.8	1.0	1.5
เขตพื้นที่เมือง (Urban)	1.0	2.0	2.0	1.5
พื้นที่ทะเลทราย (Desert Shrubland)	3.0	4.0	6.0	6.0

ที่มา : Revised Draft User's Guide For The Aermot Meteorological Preprocessor (AERMET) (1998, น.4-53)

ตารางที่ 2.5 ค่า Bowen ratio แบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและฤดูกาล ในสภาวะที่มีความชื้นปกติ (DAYTIME BOWEN RATIO BY LAND-USE AND SEASON WET CONDITIONS)

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)	ฤดูใบไม้ผลิ (Spring)	ฤดูร้อน (Summer)	ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn)	ฤดูหนาว (Winter)
แหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำทะเล (Fresh water and sea)	0.1	0.1	0.1	0.3
ป่าไม้ผลัดใบ (Deciduous Forest)	0.3	0.2	0.4	0.5
ป่าสน (Coniferous Forest)	0.3	0.2	0.3	0.3
หนองน้ำ บึง (Swamp)	0.1	0.1	0.1	0.5
พื้นที่การเกษตร (Cultivated Land)	0.2	0.3	0.4	0.5
ทุ่งหญ้า (Grassland)	0.3	0.4	0.5	0.5
เขตพื้นที่เมือง (Urban)	0.5	1.0	1.0	0.5
พื้นที่ทะเลทราย (Desert Shrubland)	1.0	5.0	2.0	2.0

ที่มา : Revised Draft User's Guide For The Aermot Meteorological Preprocessor (AERMET) (1998, น.4-53)

ตารางที่ 2.6 ค่า Surface Roughness length แบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและฤดูกาล  
(SURFACE ROUGHNESS LENGTH BY LAND-USE AND SEASON )

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)	ฤดูใบไม้ผลิ (Spring)	ฤดูร้อน (Summer)	ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn)	ฤดูหนาว (Winter)
แหล่งน้ำจืดและน้ำทะเล (Fresh water and sea)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
ป่าไม้ผลัดใบ (Deciduous Forest)	1.00	1.30	0.80	0.50
ป่าสน (Coniferous Forest)	1.30	1.30	1.30	1.30
หนองน้ำ บึง (Swamp)	0.20	0.20	0.20	0.05
พื้นที่การเกษตร (Cultivated Land)	0.05	0.10	0.01	0.001
ทุ่งหญ้า (Grassland)	1.00	1.00	1.00	1.00
เขตพื้นที่เมือง (Urban)	0.30	0.30	0.30	0.15
พื้นที่ทะเลทราย (Desert Shrubland)	5.0	6.0	10.0	10.0

ที่มา : Revised Draft User's Guide For The Aermod Meteorological Preprocessor (AERMET)  
(1998, น.4-54)

จากค่าที่แสดงในตาราง 2.2-2.6 เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามละติจูดและวงจรของการ  
เพาะปลูกใน 1 ปี โดย

ฤดูใบไม้ผลิ (Spring) หมายถึง ช่วงที่มีการเพาะปลูก ซึ่งอาจประยุกต์เป็นช่วง 1-2 เดือน  
หลังจากน้ำแข็งหมดไป

ฤดูร้อน (Summer) หมายถึง ช่วงที่ทำการเพาะปลูกมีความอุดมสมบูรณ์ พื้นที่เป็นสีเขียว  
ชุ่ม

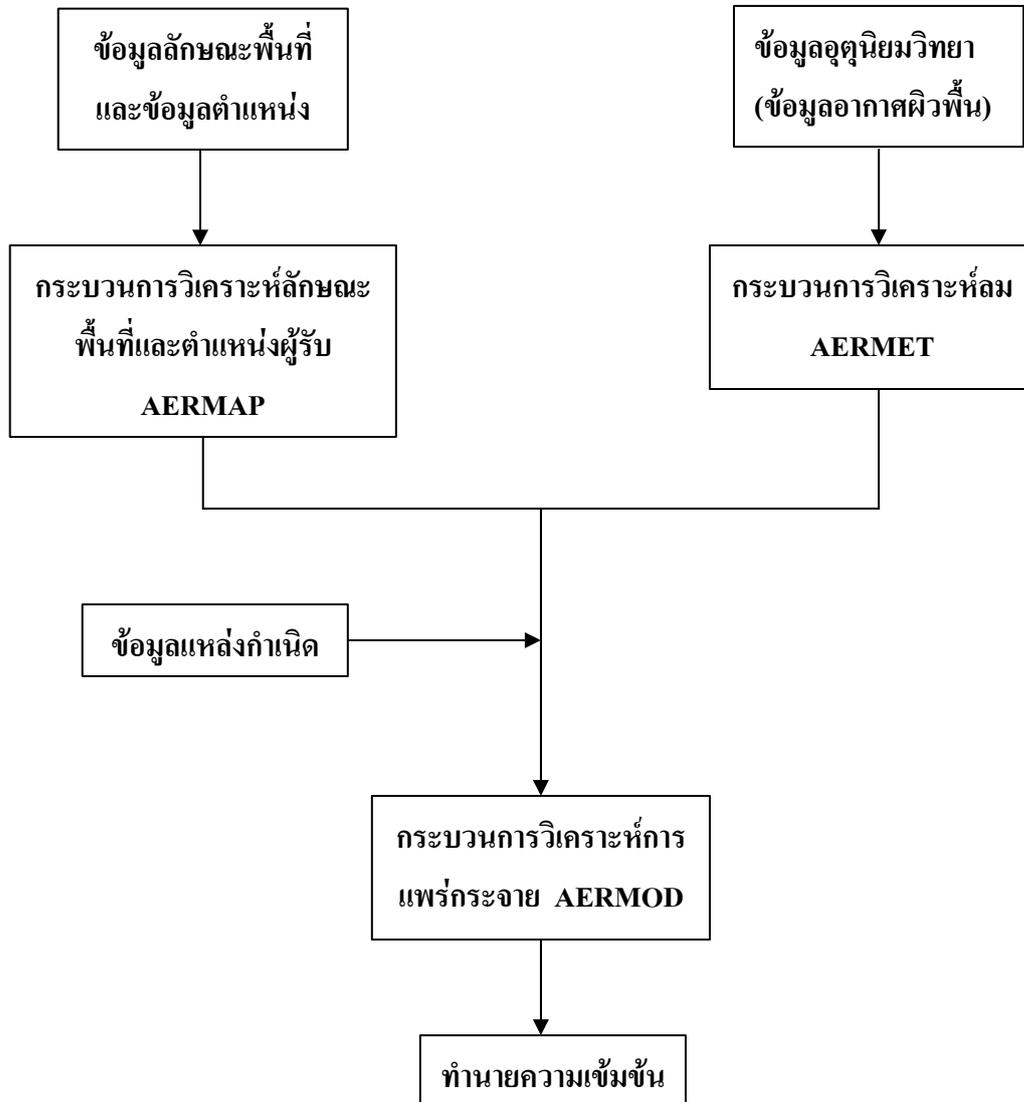
ฤดูใบไม้ร่วง (Autumn) หมายถึง ช่วงสภาวะที่มีน้ำแข็ง ดัน ไม้ผลัดใบจนเหลือน้อย พื้นดิน  
ว่างเปล่าหลังจากการเก็บเกี่ยว หญ้าเป็นสีเทาและไม่มีหิมะ

ฤดูหนาว (Winter) หมายถึง ช่วงที่มีหิมะปกคลุมพื้นดิน และอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

### 2.3.8. ข้อมูลนำเข้า AERMAP

- ก. ลักษณะและตำแหน่งของพื้นที่
- ข. ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและตำแหน่งของผู้รับ  
ข้อมูลแหล่งกำเนิด

ตำแหน่ง, ความสูงของแหล่งกำเนิด, อัตราการปล่อย, ความสูงปล่อง, อุณหภูมิอนุภาคที่ปล่อยจากปล่อง, ความเร็วแก๊สที่ปล่อยจากปล่อง, และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปล่อง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลอง AERMOD

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นคือ

$$C_T \{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s} \{x_r, y_r, z_r\} + (1-f) \cdot C_{c,s} \{x_r, y_r, z_p\} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $C_T \{x_r, y_r, z_r\}$  = ความเข้มข้นรวมทั้งหมด

$C_{c,s} \{x_r, y_r, z_r\}$  = ความเข้มข้นจากพุ่มในแนวราบ

$C_{c,s} \{x_r, y_r, z_p\}$  = ความเข้มข้นในแนวตั้ง

$f$  = สัดส่วนของมลภาวะอากาศที่อยู่ใน plume ในแนวราบและแนวระดับ

$$\{x_r, y_r, z_p\} = \text{ตำแหน่งผู้รับ}$$

หรืออาจเขียนได้เป็น

$$C\{x_r, y_r, z_r\} = (Q/\tilde{u})P_y\{y; x\}P_z\{z; x\} \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- $Q$  = อัตราการปล่อยมลภาวะอากาศจากแหล่งกำเนิด
  - $\tilde{u}$  = ความเร็วลมที่รับความสูงของแนวแกน plume
  - $P_y$  = ฟังก์ชันการแพร่กระจายของ plume ในแนวระดับ
  - $P_z$  = ฟังก์ชันการแพร่กระจายของ plume ในแนวตั้ง

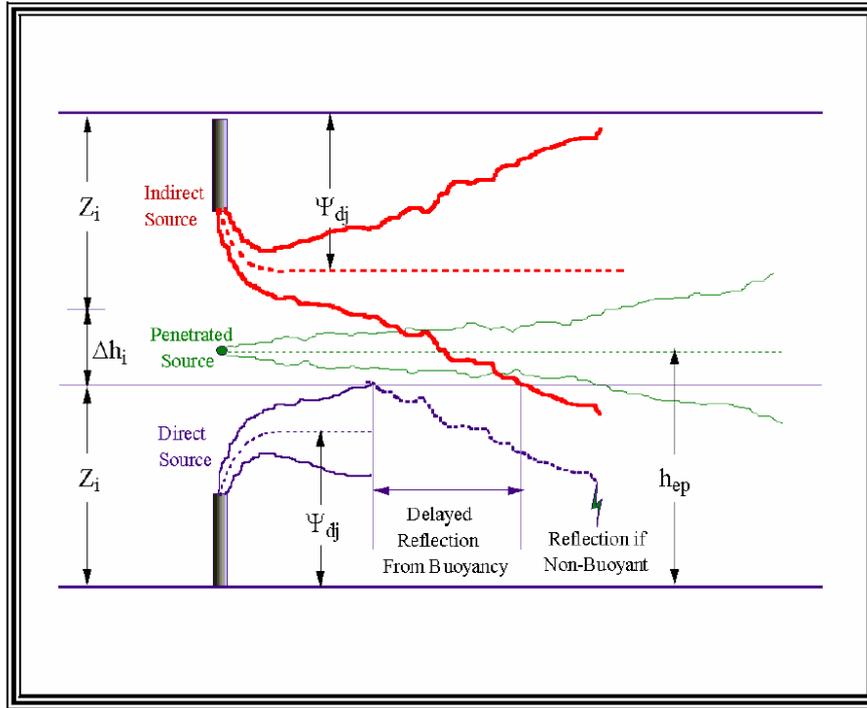
สมการที่ใช้คำนวณความเข้มข้นแบ่งออกเป็น

1) ความเข้มข้นชั้น CBL

$$C_c\{x_r, y_r, z_r\} = C_d\{x_r, y_r, z_r\} + C_r\{x_r, y_r, z_r\} + C_p\{x_r, y_r, z_r\} \quad (2.8)$$

เมื่อ

- $C_d$  = ความเข้มข้นของ plume ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดจริง
- $C_r$  = ความเข้มข้นของ plume ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสมือน
- $C_p$  = ความเข้มข้นของ plume ที่ทะลุผ่านชั้นความสูงผสมทั้งจากแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือน



รูปที่ 2.10 แหล่งกำเนิดชั้น CBL

ที่มา : AERMOD: Description of Model Formulation Version.022220., October 31,2002

2) การคำนวณความเข้มข้นของ plume ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดจริง

$$C_d(x_r, y_r, z_r) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi\bar{u}}} \cdot F_y \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}^2} \left( \exp\left(-\frac{(z - \psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - \psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\bar{u}$  = ความเร็วลมที่ระดับความสูงปล่อง (m/s)

$F_y$  = function การแพร่กระจายตามแนวราบ ( $m^{-1}$ )

$$F_y = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $Z$  = ความสูงของผู้รับ (m)

$\Psi_{dj}$  = ความสูงของ plume จากแหล่งกำเนิดจริง (m)

$Z_i$  = ความสูงของชั้นผสม (Mixing height) (m)

$f_p$  = fraction ของมวลที่คงที่อยู่ใน plume ในชั้น CBL

$f_p = 0$  ถ้า  $\Delta h_h < 0.5\Delta h_{eq}$

$$f_p = 1 \text{ ถ้า } \Delta h_h > 0.5 \Delta h_{eq}$$

$$f_p = \frac{\Delta h_h}{\Delta h_{eq}} - 0.5 \text{ ถ้า } \Delta h_{eq} < \Delta h_h < 0.5 \Delta h_{eq}$$

เมื่อ

$$\Delta h_h = z_i - h_s$$

$$Z_i = \text{ชั้นความสูงผสม (m)}$$

$$h_s = \text{ความสูงของปล่อง (m)}$$

$$h_{eq} = \text{ความสูงที่กลาง plume ของ plume ที่ทะลุผ่านชั้นความสูงผสมทั้งจากแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือน (m)}$$

$$\sigma_{z_j} = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้งสำหรับ (updraft } j = 1, \text{ downdraft } j = 2)$$

$$\lambda_j = \text{สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักการกระจาย (updraft } j = 1, \text{ downdraft } j = 2)$$

3) การคำนวณความเข้มข้นของ plume ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสมือน

$$C_r \{x_r, y_r, z\} = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi\tilde{u}}} F_y \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{z_j}^2} \left( \exp\left(-\frac{(z + \psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{z_j}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - \psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{z_j}^2}\right) \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\Psi_{rj} = \Psi_{dj} - \Delta h$$

$$\Delta h = \text{plume rise จากแหล่งกำเนิดเสมือน (m)}$$

4) การคำนวณความเข้มข้นของ plume ที่ทะลุผ่านชั้นความสูงผสมทั้งจากแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือน

$$C_p \{x_r, y_r, z\} = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi\tilde{u}\sigma_{z_p}}} F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \exp\left(-\frac{(z - h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{z_j}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{z_j}^2}\right) \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$z_{ieff} = \text{ความสูงของชั้นที่เกิดการสะท้อนใน stable layer (m)}$$

$$\sigma_{z_p} = \text{สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวตั้ง (m)}$$

$$h_{ep} = \text{ความสูงที่กลาง plume ที่ทะลุผ่านชั้นความสูงผสมทั้งจากแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือน (m)}$$

5) ความเข้มข้นในชั้น SBL

$$C_z(x_r, y_r, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_{zs}} F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \exp\left(-\frac{(z-h_{ep}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{ep}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ

$\sigma_{zp}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวดิ่งของ SBL (m)

$F_y$  = function การแพร่กระจายตามแนวราบ ( $m^{-1}$ )

$h_{ep}$  = ความสูงที่กลาง plume (m)

$z_{ieff}$  = ความสูงของชั้นที่เกิดการสะท้อนใน SBL

### 2.3.9 รูปแบบของแบบจำลอง AERMOD

เมื่อเก็บข้อมูลของแหล่งกำเนิดและอุตุนิยมวิทยาได้ครบสมบูรณ์แล้ว ก็สามารถนำข้อมูลเข้ามาใส่ตามรูปแบบ (Format) ของ AERMOD ได้ ยกเว้นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจะต้องผ่านขั้นตอนของโปรแกรม AERMET ก่อนจึงจะได้ไฟล์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่สามารถนำไปใช้กับแบบจำลอง AERMOD ได้ รูปแบบโครงสร้างของ AERMOD ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ดังนี้

#### 1. Control Option (CO)

ประกอบด้วยการตั้งชื่อไฟล์ การตั้งค่า default (ในแบบจำลอง AERMET) มีการคำนวณค่าที่เหมาะสมโดยการผ่านการรับลอง (Default) ไว้แล้วเช่น คำนวณค่าการไหลย้อนของควัน (Stack tip wash) คำนวณค่าการลอยตัวขึ้นของพุ่มเนื่องจากแรงลอยตัว (buoyancy induced) ไม่คำนวณค่าการลอยตัวขึ้นของพุ่มน้อย ๆ (Gradual plume rise) ยกเว้นมีอาคาร คำนวณค่าความเร็วลมเป็นศูนย์ (Calm) คำนวณค่าความเข้มข้นที่มีผลมาจากอาคาร ตั้งค่า default ของความเร็วลมที่ความสูงระดับต่าง ๆ ตั้งค่า default ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงแต่ถ้าไม่ต้องการค่า default ก็ สามารถเลือกให้คำนวณในทางตรงข้ามได้ การใส่ค่าเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงหรือเป็นช่วงเวลาก็ได้ การใส่ชนิดมลสาร การใส่ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัวของมลภาวะอากาศ และการใส่ชื่อไฟล์ที่บอกข้อผิดพลาดให้ทราบ เป็นต้น

#### 2. Source Option (SO)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แหล่งกำเนิดคือเตาเผามูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาลค่ายสรรพสิทธิประสงค์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุดที่ประกอบด้วยตำแหน่งพิกัดที่ตั้งของแหล่งกำเนิด อัตราการปล่อยมวลสาร(กรัมต่อวินาที) ความสูงของปล่อง (เมตร) อุณหภูมิของปล่อง (เคลวิน) ความเร็วของมลภาวะอากาศที่ออกจากปล่อง (เมตรต่อวินาที) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปล่อง (เมตร)

#### 3. Receptor Option (RE)

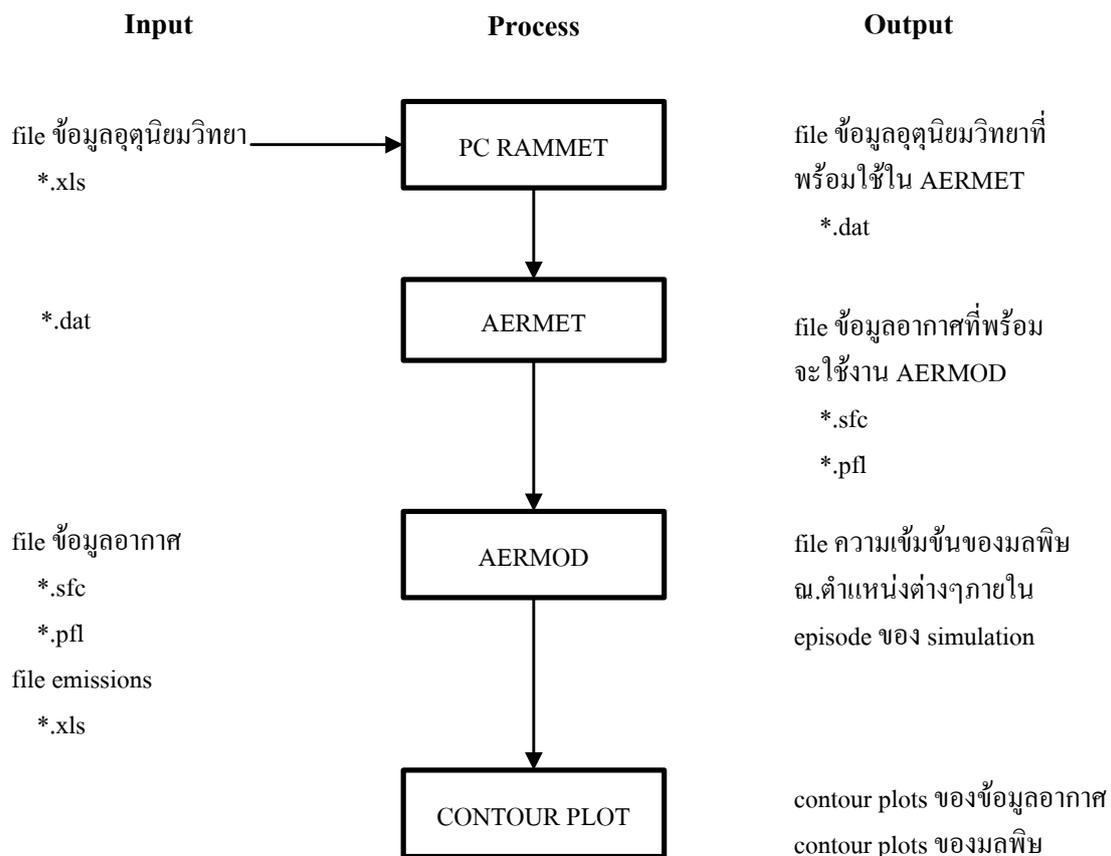
ประกอบด้วย การเลือกพื้นที่ของผู้รับ (Reception) เป็นแบบตารางสี่เหลี่ยม (Cartesian) หรือ แบบวงกลม (Polar) การเลือกตำแหน่งพิกัดเป็นแบบจุดหรือแบบพื้นที่ก็ได้ ถ้าเลือกแบบพื้นที่ ก็ต้องใส่ค่าจุดเริ่มต้นของแกน x จำนวนผู้รับของแกน x ระยะห่างระหว่างผู้รับของแกน x จุดเริ่มต้นของแกน y และระยะห่างระหว่างผู้รับของแกน y

#### 4. Meteorology Option (ME)

ประกอบด้วยการใช้ชื่อ ไฟล์อุตุนิยมวิทยา การใส่ระดับความสูงของเสาตรวจวัดลม โดยปกติจะใช้ที่ระดับความสูง 10 เมตร เป็นระดับอ้างอิง การใส่เลขประจำสถานีอุตุนิยมวิทยาและใส่ปี ค.ศ. จะต้องให้ตรงกับไฟล์อุตุนิยมวิทยาที่ทำในโปรแกรม AERMOD ด้วยนอกจากนี้ยังมีการแบ่ง ช่วงของความเร็วลมในรูปแบบที่กำหนดออกเป็น 5 ช่วง ซึ่งช่วงเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้แต่ ไม่สมควรเพราะโปรแกรมที่ใช้ทำ Wind rose จะบังคับช่วงของความเร็วลมให้อยู่ในรูปแบบที่กำหนดไว้

#### 5. Output Option (Ou)

เป็นการรายงานผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเลือกค่าความเข้มข้นในลำดับต่าง ๆ การเลือกรูปแบบเพื่อใช้ในการทำ Contour line การเลือกช่วงเวลาในการคำนวณค่าความเข้มข้น ใน Output Option (Ou) นี้จะต้องให้ตรงกับค่าความเข้มข้นของช่วงเวลา que เลือกใน Control Option (CO)



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการทำนายการแพร่กระจายของมลพิษโดยโปรแกรม AERMET และ AERMOD

## 2.4 มลภาวะอากาศภายในอาคาร

มลภาวะอากาศภายในอาคารซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงานของผู้อาศัยหรือใช้เวลาอยู่ในอาคารสามารถจำแนกออกได้คร่าว ๆ เป็น 3 ประเภทด้วยกัน ดังนี้คือ 1) สิ่งปนเปื้อนทางชีววิทยา (biological contaminants) 2) สิ่งปนเปื้อนทางเคมี (chemical contaminants) และ 3) อนุภาคมลสาร (particulates) ผลกระทบอันเนื่องมาจากการได้รับมลภาวะอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ building-related illness (BRI) และ sick building syndrome (SBS) โดยที่ BRI หมายถึงความเจ็บป่วยที่สามารถวินิจฉัยได้ และเป็นผลเนื่องมาจากการได้รับอากาศภายในอาคาร ซึ่งทราบถึงต้นเหตุของความเจ็บป่วยนั้น ๆ ในทางตรงกันข้าม SBS ใช้อธิบายถึงผลกระทบอย่างเฉียบพลันต่อสุขภาพของผู้อาศัยซึ่งเกี่ยวข้องกับเวลาที่ใช้ในอาคาร แต่ไม่สามารถวินิจฉัยความเจ็บป่วยและสาเหตุของการเกิดความเจ็บป่วยนั้น ๆ ได้ ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดขึ้นกับผู้อยู่ในอาคารเฉพาะบางห้องหรือบางพื้นที่หรืออาจจะตลอดทั้งอาคารก็ได้ (US.EPA, 2003)

ตัวบ่งชี้หรืออาการที่เกี่ยวข้องกับ SBS มีดังนี้คือ

1. ผลกระทบเฉียบพลันต่อความไม่สบายของผู้อาศัยอยู่ในอาคาร ยกตัวอย่างเช่น ปวดศีรษะ ระบายท้อง จมูก และคอ วิงเวียนและคลื่นไส้ ค้นตามผิวหนัง เป็นต้น
2. ไม่สามารถระบุสาเหตุของอาการต่าง ๆ ได้
3. อาการที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะหายไปอย่างรวดเร็ว หลังจากผู้อาศัยหรืออยู่ในอาคารได้ออกจากอาคารนั้น ๆ แล้ว

ตัวบ่งชี้หรืออาการที่เกี่ยวข้องกับ BRI มีดังนี้คือ

1. ผู้อาศัยอยู่ในอาคารมีอาการไอ แน่นหน้าอก เป็นไข้ หนาวสั่น และปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ
2. อาการต่าง ๆ เหล่านี้สามารถวินิจฉัย และระบุสาเหตุของการเกิดได้
3. อาการต่าง ๆ เหล่านี้จะไม่หายไปในเวลาสั้น ๆ หลังจากผู้อาศัยหรืออยู่ในอาคารได้ออกไปจากอาคารนั้น ๆ แล้ว

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์จากการได้รับมลภาวะอากาศภายในอาคารสามารถจำแนกออกได้เป็นแบบเฉียบพลัน (acute) เรื้อรัง (chronic) ความไม่สบาย (discomfort) และผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน (performance) ผลกระทบแบบเฉียบพลันเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากได้รับมลภาวะอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดอาการทั่ว ๆ ไปดังนี้คือ ปวดศีรษะ ระบายท้องและจมูก ซึ่งโดยปกติแล้วอาการเหล่านี้จะหายไปอย่างรวดเร็วหลังจากไม่ได้รับมลภาวะอากาศเหล่านั้นแล้ว ส่วนผลกระทบแบบเรื้อรังเป็นผลเนื่องมาจากการได้รับมลภาวะอากาศเป็นเวลายาวนานต่อเนื่อง ซึ่งอาการที่พบมากที่สุดคือโรคหอบเรื้อรัง สำหรับผลกระทบอื่น ๆ ที่พบได้ทั่วไปอันได้แก่ โรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ การระบายท้อง จมูก และคอ โดยที่ผลกระทบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับสภาวะอากาศภายในอาคาร ส่วนผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน สามารถบ่งบอกได้จากความมีสมาธิและความสามารถในการทำงานที่ลดลง (วิภาดา สนองราษฎร์ และ วิภาวี จำวิจิตร, 2004)

องค์ประกอบที่สำคัญของการเกิดมลภาวะอากาศในอาคาร ได้แก่ แหล่งกำเนิด (sources) และการระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม (poor ventilation) การพิจารณาว่าแหล่งกำเนิดใดก่อให้เกิดปัญหามากที่สุดสามารถพิจารณาได้จาก 2 ปัจจัยด้วยกันดังนี้คือ ปริมาณของมลภาวะอากาศที่ถูกปลดปล่อยออกมา และความเป็นอันตรายของมลภาวะอากาศนั้น ๆ

เนื่องจากมลภาวะอากาศภายในอาคารสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากภายในอาคารและภายนอกอาคาร (จากมลภาวะอากาศภายนอกอาคารที่ปนเปื้อนมากับอากาศที่ไหลเข้ามาแลกเปลี่ยนกับอากาศภายในอาคาร) ดังนั้นการป้องกันและลดมลภาวะอากาศภายในอาคารจึงควรกระทำควบคู่กันไปทั้งการควบคุมและบำบัดมลภาวะอากาศที่อยู่ในอาคาร โดยใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีต่าง ๆ และการควบคุมให้มีการระบายอากาศที่เพียงพอซึ่งเป็นอากาศสะอาดและไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้น

ของมลภาวะอากาศภายในอาคาร รวมไปถึงการควบคุมมลภาวะอากาศที่แหล่งกำเนิด (วิภาดา สอนองราษฎร์ และ วิภาวี ขำวิจิตร, 2004)

เทคโนโลยีโดยทั่วไปที่ใช้ในการบำบัดมลภาวะอากาศสามารถแบ่งออกได้คร่าว ๆ เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดอนุภาคมลสาร ยกตัวอย่างเช่น High Efficiency Particulate Air (HEPA) filter, ion generator, และ electronic air cleaners และเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดมลภาวะอากาศที่เป็นก๊าซ เช่น กระบวนการดูดซับ (adsorption processes) เป็นต้น (วิภาดา สอนองราษฎร์ และ วิภาวี ขำวิจิตร, 2004)

การระบายอากาศ (ventilation) หรือการแลกเปลี่ยนอากาศภายในและภายนอกอาคาร (air exchange) จัดเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดปริมาณมลภาวะอากาศภายในอาคาร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดูแลระบบระบายอากาศ รวมไปถึงระบบทำความร้อนและความเย็นในอาคารอย่างเหมาะสม และไม่ให้มีสิ่งกีดขวางการระบายอากาศหรือควันจากการประกอบอาหาร อีกทั้งผู้ที่อาศัยหรือทำงานอยู่ในอาคารควรปฏิบัติตามกฎของอาคารนั้น ๆ อย่างเคร่งครัด เช่นไม่ควรสูบบุหรี่ในบริเวณใกล้กับช่องทางระบายอากาศภายนอกอาคาร

การควบคุมมลภาวะอากาศที่แหล่งกำเนิดสามารถปฏิบัติได้ค่อนข้างง่าย ๆ เช่น ลดการใช้สารเคมีซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะอากาศ ไม่สูบบุหรี่ภายในอาคารหรือสูบบุหรี่เฉพาะในบริเวณที่จัดไว้เท่านั้น รวมถึงมีจัดการกับมูลฝอย และระบบทำความร้อนและความเย็นอย่างถูกวิธี อีกทั้งควรทำความสะอาดอาคารที่พักอาศัยและสำนักงานเป็นประจำเพื่อช่วยลดมลภาวะอากาศที่อาจเกิดขึ้นในอาคาร และควรติดต่อเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ดูแลทางด้านมลภาวะอากาศหากมีข้อสงสัยหรือคาดว่ามีปัญหาหมอกควันมลภาวะอากาศเกิดขึ้นในอาคาร

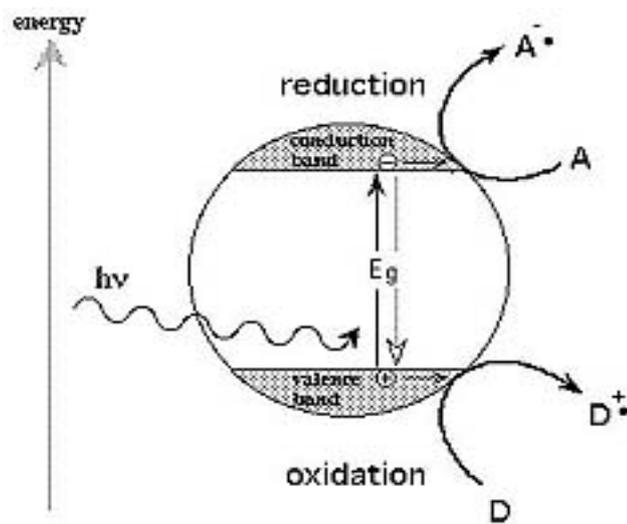
## 2.5 การจัดการมลภาวะอากาศภายในอาคารด้วยกระบวนการโฟโตคะตาไลติกออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตคะตาไลซิส เป็นกระบวนการที่มีการใช้ทั้งในด้านกรบำบัดน้ำและอากาศให้บริสุทธิ์ ซึ่งหลักเบื้องต้นของกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส คือ การกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสง (Photo) ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยสารอินทรีย์ในน้ำหรืออากาศ จะถูกออกซิไดซ์จนกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Obee and Brown, 1995)

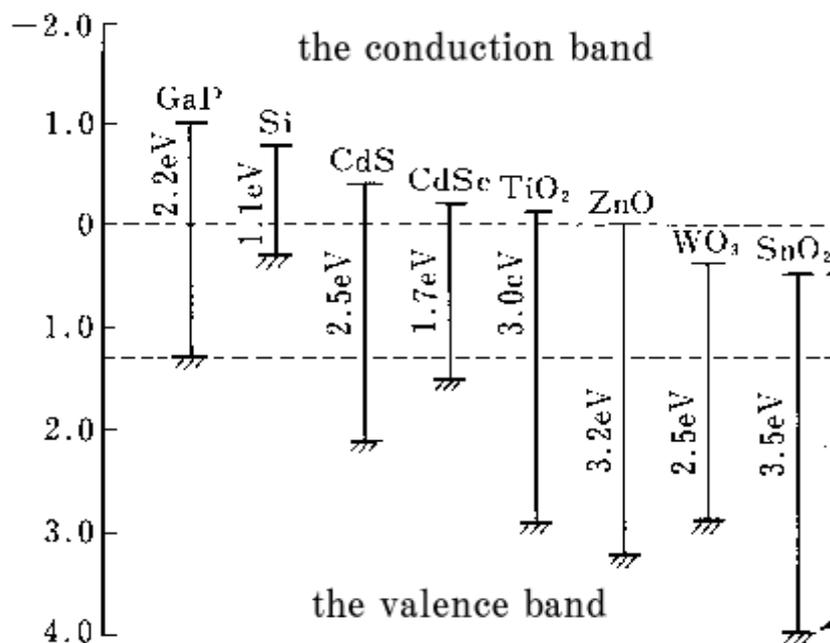
### 2.5.1 กระบวนการโฟโตคะตาไลซิส

ในกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอน ได้เป็น 2 แถบพลังงาน แถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูงเรียกว่า วาเลนซ์แบนด์ (valence band) อีกด้านหนึ่งเป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอนเรียกว่า คอนดักชันแบนด์ (conduction band) โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วย

ระยะห่างซึ่งเรียกว่า แบนด์แกป (band gap) โดยโครงสร้างอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแสดงดังรูปที่ 2.12 ค่าของช่องว่างพลังงาน (energy gap,  $E_g$ ) จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีค่าช่องว่างพลังงานแตกต่างกันออกไป โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเสถียรภาพที่สุด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม หลังการใช้งานจะเกิดการกักตร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งยังมีราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ ในงานด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านการบำบัดน้ำให้บริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย การควบคุมของเสียอันตรายและการบำบัดอากาศ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 รูปแบบได้แก่ แอนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคท์ (brookite) แต่ผลึกที่นิยมนำมาใช้ด้านการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ 2 ชนิดคือ แอนาเทส (anatase) และรูไทล์ (rutile) (Litter, 1999) ซึ่งผลึกทั้งสองแบบนี้มีค่าช่องว่างพลังงานแตกต่างกัน แอนาเทสมีค่า  $E_g = 3.3 \text{ eV}$ . ส่วน รูไทล์มี  $E_g = 3.1 \text{ eV}$ . ในกระบวนการโฟโตคะตาไลซิสนั้น แอนาเทสจะมีศักยภาพที่สูงกว่ารูไทล์



รูปที่ 2.12 กระบวนการโฟโตคะตาไลซิสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคของคะตาลีส (Litter, 1999)



รูปที่ 2.13 ค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ (Litter, 1999)

กระบวนการโฟโตคะตาไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การดูดติดผิว (adsorption) และการฉายแสง (irradiation)

#### ก. กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิว (interface) กระบวนการดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวน้ำของ 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว (interface) โดยการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซจากสถานะที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ใช้ในการดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (adsorbent) (Alberici and Jardim, 1997)

#### ข. กระบวนการฉายแสง (Irradiation)

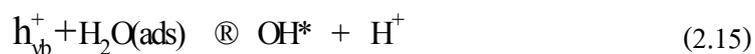
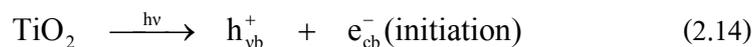
เมื่อมีการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในระดับที่มากกว่าหรือเท่ากับค่า bandgap ตกกระทบลงบนอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว จะมีอิเล็กตรอนเลื่อนหลุดออกมาและกระโดดข้ามฝั่งของวาเลนซ์แบนด์ไปยังฝั่งคอนดักชันแบนด์ พร้อม ๆ กันนั้น ทางฝั่งของวาเลนซ์แบนด์ก็จะเกิดช่องว่างขึ้น เรียกว่า โฮล (hole ( $h^+$ )) อิเล็กตรอนกับโฮลนี้มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยจะมีการรับและให้อิเล็กตรอนของฝั่งวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ตามลำดับ รวมเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) แต่ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนกับโฮล ก็

สามารถกลับมารวมตัวกันได้อีกในเวลาอันรวดเร็ว เรียกปฏิกิริยานี้ว่า รีคอมบิเนชัน (recombination) การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล จะทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นและเป็นข้อจำกัดหลักของอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (Alberici and Jardim, 1997)

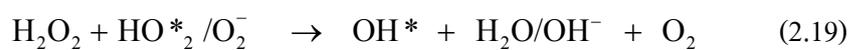
### 2.5.2 กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส

กลไกโดยทั่วไปที่เกิดในกระบวนการโฟโตคะตาไลซิส สามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (Dechapanya, 1999)

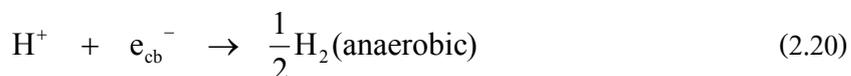
ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป :



ปฏิกิริยาการแพร่ที่เกิดขึ้น (The propagation reactions) :



ปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน



จากสมการที่ 2.14 เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานโฟตอน ( Photon energy ) ที่มากพอ จะก่อให้เกิดการกระตุ้นของวาเลนซ์อิเล็กตรอนจาก Valence band ไปยัง Conduction band ทำให้ใน Valence band เกิด hole ขึ้น เรียกว่า Valence band hole ( $h_{vb}^+$ ) ซึ่งพลังงานโฟตอนที่น้อยที่สุดที่ต้องการในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับช่วงพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ มีช่วงพลังงานอยู่ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเทียบเท่ากับแสงที่มีความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร (nm) conduction band electron อาจเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือกลับไปรวมตัวกับ hole ภายใน lattice ของผลึก เป็นผลให้เกิดความร้อนและแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและ hole จะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เกิดขึ้นกับสารที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น น้ำ ไฮดรอกไซด์ไอออน ออกซิเจน และสารอินทรีย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาขั้นต้นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ น่าจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl

radicals, OH<sup>\*</sup>) ซึ่งกลไกของการก่อตัวของไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อธิบายไว้โดยนักวิทยาศาสตร์หลายคน (Dechapanya, 1999) ทั้งนี้ขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อตัวของไฮดรอกซิลเรดิคัล อาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง  $h_{\nu}^+$  และ H<sub>2</sub>O หรือ OH<sup>-</sup> ดังแสดงในสมการ 2.15 และ 2.16 นอกจากนี้ไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจจะก่อตัวมาจาก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) หรือ เปอร์ไฮดรอกซิลไอออน (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>) โดยปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่ง ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.17 – 2.18 อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอาจจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็น O<sub>2</sub><sup>-</sup> ดังสมการที่ 2.21 ซึ่งเป็นผลให้เกิด OH<sup>\*</sup> เช่นกัน หรืออาจจะทำปฏิกิริยากับ H<sup>+</sup> เกิดเป็นไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศ ดังแสดงในสมการที่ 2.20 จากนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ จนเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Obee and Brown, 1995)