อิทธิพลของฝนจำลองที่มีอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบต่อสมบัติเคมีและธาตุอาหารในดิน

Effect of Simulated Rain Containing Sulfate and Oxide of Nitrogen on Chemical Properties and Plant Nutrition of Soils

คำนำ

มลพิษทางอากาศเพิ่มมากขึ้นนับตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมเป็นต้นมา การขยายตัวทางอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว การเจริญของเมือง และการใช้เชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์จำนวนมาก เป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดสารมลพิษที่เป็นอันตราย ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อนุภาคแขวนลอย ออกไซด์ของไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน (งามจิตต์ และคณะ, 2544) เมื่อสารมลพิษเหล่านี้รวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศ แล้วตกลงมาเป็นฝนที่มีสภาพเป็นกรด สารประกอบออกไซด์ของก๊าซต่าง ๆ จึงถูกดูดซับโดยตรงและเคลื่อนย้ายภายในหน้าตัดดิน มีบางส่วนสะสมค้างอยู่ในดิน และบางส่วนจะลงไปสะสมในแหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป ซึ่งแต่ละชุดดินมีองค์ประกอบและสัดส่วนของอนุภาคแบบปฐมภูมิในการเกิดที่ไม่เหมือนกัน ประกอบกับมีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่แตกต่างกัน จึงอาจได้รับผลกระทบจากฝนกรดต่างกันออกไป

ฝนกรดจะชะล้างธาตุอาหารที่จำเป็นของพืชออกไปจากดิน เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม อาจทำลายหรือยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน ทำลายเนื้อเยื่อพืช ลดความสามารถของรากพืชในการดูดน้ำและธาตุอาหาร และยังทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินเปลี่ยนแปลงไปด้วย (Environmental Resources Limited, 1983) นอกจากนี้อนุมูลของธาตุต่าง ๆ ที่ถูกฝนกรดชะล้างออกมาจากดิน จะไปสะสมอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งที่เป็นแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน ทำให้ระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น ๆ เปลี่ยนแปลงไป สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เช่น แพลงก์ตอน ปลา สัตว์น้ำ และพืชน้ำบางชนิดจะได้รับผลกระทบโดยตรงต่อการดำรงชีวิต รวมไปถึงสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ บนโลกไม่ว่าจะเป็นพืชและสัตว์ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ ต่างได้รับผลกระทบจากฝนกรดทั้งสิ้น และสุดท้ายตัวมนุษย์เองก็จะได้รับผลกระทบนี้เช่นกัน

สำหรับประเทศไทยภายหลังจากปรากฏการณ์ฝนกรดเมื่อต้นเดือนตุลาคม พ.ศ. 2535 อันเนื่องมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้ปล่อยสารกำมะถันปะปนออกมากับขี้เถ้า และฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศในปริมาณที่มากเกินมาตรฐาน ทำให้ประชาชนนับสิบหมู่บ้านเจ็บป่วยด้วยโรคทางเดินหายใจนับพันคน มีสัตว์เลี้ยง และพืชผลได้รับความเสียหายอีกจำนวนหนึ่ง (นิรันดร์,

2546) ทำให้เกิดการตื่นตัวต่อสภาวการณ์ดังกล่าว จึงมีการจัดตั้งเครือข่ายการติดตามตรวจสอบการตกสะสมของกรดในประเทศไทย (Acid Deposition Monitoring Network in Thailand) โดยความร่วมมือของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญจากสถาบันการศึกษาต่าง ๆ (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2549) และได้มีการรายงานสภาพน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไว้ในตารางผนวกที่ 1 และ 2

การศึกษาผลกระทบของมลพิษทางอากาศที่ทำให้เกิดฝนกรดต่อคุณสมบัติของดิน จึงคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการดูดซับธาตุอาหารของดินและพืช เพราะดินที่ถูกชะด้วยน้ำฝนที่มีระดับ pH ต่ำ ๆ เป็นเวลานาน จะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในหน้าตัดดิน ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงระดับ pH ของดินที่จะมีผลต่อช่วงความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารของพืช ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการประเมินความเสียหาย และแนวโน้มของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้มีข้อมูลเพื่อการวางแผนการใช้ที่ดินชุดต่าง ๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมแตกต่างกันและได้รับฝนกรดในระดับปริมาณแตกต่างกัน

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา

1. อิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต และออกไซด์ของไนโตรเจน ต่อสมบัติทางเคมีดิน ได้แก่ ปฏิกิริยาดิน ค่าการนำไฟฟ้าของดิน และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

2. อิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจนต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

3. อิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจนต่อการนำธาตุอาหารหลักไปใช้ในส่วนต่าง ๆ ของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกอยู่บนชุดดินต่าง ๆ

4. อิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจนต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของกระเจี๊ยบเขียวและค่าพลังงานศักย์น้ำภายในใบ

โดยใช้ 4 ชุดดิน ได้แก่ ชุดดินอยุธยา ชุดดินบางกอก ชุดดินกำแพงแสน และชุดดินสัตหีบ สำหรับงานวิจัยนี้

การตรวจเอกสาร

1. มลพิษทางอากาศ

1.1 นิยาม

มีผู้ให้นิยามมลพิษทางอากาศไว้มากมายหลายรูปแบบ ได้แก่

มลพิษทางอากาศ (air pollution) หมายถึง ภาวะทางอากาศที่มีการเจือปนของสารพิษในปริมาณที่ทำให้อากาศเสื่อมคุณภาพ ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์และพืช ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม (เกษม, 2530)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง การที่มีสิ่งแปลกปลอมซึ่งเป็นสารมลพิษปะปนเข้ามาสู่บรรยากาศอาจโดยธรรมชาติ หรือโดยการกระทำของมนุษย์ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อมเป็นปริมาณมากจนเกิดผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ พืช หรือวัตถุต่างๆ ส่วนใหญ่ภาวะมลพิษทางอากาศมักพบในเมืองใหญ่ๆ ที่มีอาคารสิ่งก่อสร้างสูง มีการจราจรคับคั่ง ติดขัด หรือในเขตอุตสาหกรรมใหญ่ๆ ซึ่งสารมลพิษที่ถูกปล่อยสู่บรรยากาศในขณะหนึ่งมีปริมาณมากเกินไปและไม่สามารถกระจายออกไปได้ทันที (สุรภี, 2532)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง ภาวะของอากาศที่มีสารเจือปนในปริมาณที่มากพอและเป็นระยะเวลาที่นานพอที่จะทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของคน สัตว์ พืช และวัสดุต่างๆ สารที่กล่าวถึงอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบ อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ และอาจอยู่ในรูปก๊าซ หยดของเหลว หรืออนุภาคของแข็งก็ได้ สารมลพิษทางอากาศหลักที่สำคัญ คือ ฝุ่นละออง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ตะกั่วและก๊าซโอโซน (สุพัฒน์, 2535)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง ภาวะซึ่งสารมลพิษถูกปล่อยเข้าสู่บรรยากาศโดยการกระทำของมนุษย์ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม เป็นปริมาณมากจนเกิดผลกระทบในทางลบต่อมนุษย์ สัตว์ พืช หรือวัตถุอื่นๆ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2536)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงใดๆ ในทางที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี ชีวภาพในดิน แหล่งน้ำ อาหาร อากาศ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ไป

ในทางที่ไม่เหมาะสมจนเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน อีกทั้งสิ่งมีชีวิตที่มนุษย์พึงประสงค์ (สิทธิชัย, 2541)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง อากาศของบรรยากาศนอกอาคารซึ่งมีสารมลพิษเจือปนอยู่ตั้งแต่หนึ่งชนิดหรือเกินกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป เช่น ฝุ่นละออง ละอองไอ ไอควัน ไอระเหย แก๊ส กลิ่น ควัน โดยปริมาณ คุณลักษณะและระยะเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตของมนุษย์ พืช และสัตว์ หรือทรัพย์สิน หรือเป็นการรบกวนอย่างขาดเหตุผลอันสมควร ซึ่งมีผลกระทบต่อความสุขสบายในชีวิตความเป็นอยู่ หรือมีผลกระทบต่อทรัพย์สิน (Perkins, 1974)

มลพิษทางอากาศ หมายถึง การที่อากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพปกติตามธรรมชาติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกิดจากการที่องค์ประกอบเดิมตามธรรมชาติของอากาศชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ หรือมีสิ่งแปลกปลอมไปจากองค์ประกอบตามธรรมชาติเข้ามาปะปนอยู่อย่างน้อยหนึ่งชนิด ซึ่งอาจอยู่ในรูป ฝุ่น ก๊าซ ไอระเหย ฟูม ละออง ควัน และกลิ่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบดังกล่าวมีปริมาณและระยะเวลาสัมผัสอันเพียงพอที่จะทำให้เกิดอันตราย หรือผลเสียหายต่อชีวิตของมนุษย์ สัตว์ และพืช และก่อให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งของ หรือก่อให้เกิดการรบกวนต่อการดำรงชีพ และความผาสุขของมนุษย์ (นิรันดร์, 2539)

จากนิยามข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า มลพิษทางอากาศ หมายถึง ภาวะที่อากาศมีการเจือปนของก๊าซพิษที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คุณลักษณะและปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ซึ่งสารมลพิษดังกล่าวอาจอยู่ในรูปของฝุ่น ควัน หมอก ละออง ไอ กลิ่น หรือก๊าซต่างๆ ได้แก่ ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_2, SO_3) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (N_2O, NO, NO_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า ก๊าซออกไซด์ของคาร์บอน (CO, CO_2) ก๊าซจำพวกอัลดีไฮด์ (aldehydes) และ คีโตน (ketones) ที่เกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ก๊าซที่เป็นสารประกอบฮาโลเจน ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซโอโซน และก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluoro carbons, CFCs) (นิรันดร์, 2539; พิษณุ, 2541)

1.2 ประเภทของแหล่งกำเนิดสารมลพิษทางอากาศ

สุพัฒน์ (2535) และนิรันดร์ (2539) ได้แบ่งแหล่งกำเนิดสารมลพิษทางอากาศไว้ 2 ประเภท คือ

1. แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (natural source) เป็นแหล่งกำเนิดที่เป็นตัวสร้างและระบายสารมลพิษทางอากาศออกสู่บรรยากาศ โดยเป็นไปตามกระบวนการทางธรรมชาติ ไม่มีการกระทำของมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า อนุภาคของสารต่างๆ จากดิน ละอองและเกสรจากพืช จุลินทรีย์ต่างๆ ผลจากการเน่าเปื่อยผุพังของสารอินทรีย์ เป็นต้น โดยพบว่าหากมีการระเบิดของภูเขาไฟจะมีก๊าซมลพิษเกิดขึ้นในปริมาณมาก ได้แก่ CO_2, SO_2, H_2S, HCl, HF, H_2, CO, CH_4, S_2, COS, N_2, NH_3, ฝุ่นจากภูเขาไฟ และเถ้าถ่าน (นิษฐกานต์ และคณะ, 2546) และหากมีเหตุการณ์ไฟไหม้ป่าจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน เขม่า และควัน

2. แหล่งกำเนิดที่เป็นกิจกรรมหรือการกระทำของมนุษย์ (man-made source) เป็นแหล่งกำเนิดที่มีมนุษย์หรือกิจกรรมที่มนุษย์กระทำ เป็นตัวการที่ทำให้เกิดและระบายสารมลพิษทางอากาศออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้สุพัฒน์ (2535) ยังสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดที่เป็นกิจกรรมของมนุษย์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1 แหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ (mobile source) ได้แก่ รถยนต์ เรือยนต์ เครื่องบิน รถไฟ เป็นต้น

2.2 แหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ (stationary source) ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ได้แก่ การเผาเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานความร้อน การเผาขยะมูลฝอย และกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การกลั่นน้ำมัน การผลิตปูนซีเมนต์ การหลอมโลหะประเภทต่างๆ การโม่ บด ย่อยหิน เป็นต้น

นิรันดร์ (2539) ได้แบ่งกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. การเผาไหม้ องค์ประกอบที่สำคัญของการเผาไหม้มี 3 ประการ คือ เชื้อเพลิง ออกซิเจน และอุณหภูมิ หรือความร้อน หากการเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่ในความเป็นจริงการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ น้ำ และก๊าซไนโตรเจนถ้าสารที่เผาไหม้นั้นมีหมู่ Amine เป็นองค์ประกอบ (พิษณุ, 2541) ซึ่งจะต่างกันไปตามชนิดของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น เชื้อเพลิงที่ใช้กันแพร่หลายได้แก่ น้ำมัน แก๊ส ถ่านหิน และไม้ (นิรันดร์, 2539)

2. โรงงานอุตสาหกรรม มลพิษทางอากาศอาจเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อให้ได้พลังงานสำหรับใช้ในการผลิต ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต การปรับหรือเปลี่ยนสภาพของวัตถุดิบ เช่น การบด ร่อนขนาด เป็นต้น ตัวอย่างของมลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น

2.1 อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ทำให้เกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์ สารพวกไฮโดรคาร์บอน ออกไซด์ของไนโตรเจน อัลดีไฮด์ อนุภาคต่าง ๆ แอมโมเนีย คาร์บอนมอนอกไซด์ และกลิ่นรบกวน เป็นต้น (นิรันดร์, 2539)

2.2 อุตสาหกรรมเคมี ทำให้เกิดไอของกรด ฝุ่นหรือก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต (นิรันดร์, 2539)

2.3 อุตสาหกรรมถลุงและหลอมโลหะ ทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตร-เจน ออกไซด์ของโลหะที่นำมาถลุง และออกไซด์ของโลหะที่เป็นสิ่งปลอมปน (นิรันดร์, 2539)

2. <u>ผลกระทบของก๊าซมลพิษทางอากาศ</u>

2.1 ผลกระทบต่อมนุษย์

2.1.1 ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย มีผลทั้งชนิดเฉียบพลันและชนิดเรื้อรังซึ่งอาจทำให้เกิดการเจ็บป่วยหรือบางครั้งอาจถึงตาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซมลพิษในอากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นละออง และสารตะกั่ว เป็นต้น การหายใจเอาก๊าซพิษเหล่านี้เข้าไปทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ หัวใจ และปอด (นิรันดร์, 2539)

พบว่าหากได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระยะสั้นจะทำให้โรคระบบทางเดินหายใจแย่ลง แต่หากได้รับในระยะยาวอาการป่วยด้วยโรคทางเดินหายใจจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งโรคปอดติดเชื้อเรื้อรัง (นิรันดร์, 2539) อาการทั่วไปเมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ จะมีอาการอาเจียน หายใจติดขัด จนถึงตายจากการหดเกร็งของกล้ามเนื้ออย่างฉับพลัน (พิษณุ, 2541)

ในการศึกษาของประเทศจีนได้รายงานว่า การตายเฉลี่ยในช่วง 3 ปี เนื่องจากโรคปอดและโรคระบบทางเดินหายใจของคนในชุมชนแห่งหนึ่งที่ต้องสัมผัสกับก๊าซ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 175 $\mu g\ m^{-3}$ เป็นเวลานาน มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเป็นสองเท่าของพื้นที่ที่เป็นกลุ่มควบคุม (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549) และยังพบรายงานว่าเกิดหมอกควันพิษจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้นในกรุงลอนดอนในปี ค.ศ.1952 เป็นเหตุให้ประชาชนเสียชีวิต 4,000 คน และก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพในเมืองใหญ่หลายแห่ง (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และละอองกรดกำมะถันยังก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง (ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

หากร่างกายได้รับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในระยะสั้นจะส่งผลต่อการทำงานของปอดของผู้ที่ป่วยด้วยโรคหอบหืด (นิรันดร์, 2539) นอกจากนี้จะทำให้รูปร่างลักษณะและการทำหน้าที่ของปอดเปลี่ยนแปลงไป การเจริญเติบโตช้าลง และยังส่งผลต่อภาวะภูมิคุ้มกันด้วย (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549) แต่ถ้าได้รับก๊าซนี้ในระดับหนึ่งแล้วจะมีอาการไอ ผิวหนังอักเสบ หายใจขัด และตาย ถ้าได้รับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อเนื่องนานเกิน 24 ชั่วโมง ผิวหนังและฟันจะเปลี่ยนสี (พิษณุ, 2541)

มีศึกษาเปรียบเทียบระหว่างก๊าซไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อการทำงานของปอด ปรากฏว่าก๊าซไนตริกออกไซด์มีอันตรายน้อยกว่า มนุษย์จะได้กลิ่นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 230 $\mu g\ m^{-3}$ ผู้ป่วยที่เป็นโรคหอบหืดอาจมีอาการเร็วขึ้นหากได้รับก๊าซนี้ที่ระดับ 190 $\mu g\ m^{-3}$ อากาศ ระบบหายใจในคนทั่วไปเริ่มมีอาการหายใจหอบเมื่อได้รับก๊าซนี้ 1,300-1,800 $\mu g\ m^{-3}$ (ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

สำหรับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์หากสูดดมทีละน้อยมักไม่รู้สึกผิดปกติ แต่เมื่อก๊าซทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นในจมูกจะกลายเป็นกรดกัดเนื้อเยื่อต่างๆ ทำให้รู้สึกระคายเคืองในระยะแรกๆ หลังจากนั้น 2-10 ชั่วโมง จะมีอาการน้ำท่วมปอด ไอ คันคอ วิงเวียน ปวดศีรษะ หายใจลำบาก ชีพจรเต้นเร็ว พูดไม่ได้ หน้าเซียว จนถึงหมดสติ (พิษณุ, 2541)

ถ้าได้รับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปจะทำให้ความสามารถในการลำเลียงออกซิเจนลดลง (นิรันดร์, 2539) เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (carboxyhaemoglobin: CoHb) ทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน (ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรม

ส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549) โดยเฉพาะระบบประสาท ทำให้เกิดอาการวิงเวียน ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน เซื่องซึม ชีพจรเต้นอ่อน หายใจไม่สะดวก ผิวเป็นสีคล้ำ ต่อมาหัวใจจะเต้นเร็วขึ้น หมดสติ หรือชัก และเสียชีวิตในที่สุด บางรายอาจมีอาการไตวายเฉียบพลันร่วมด้วย (พิษณุ, 2541)

หากสูดดมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในปริมาณมาก ๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากจะเกิดการละลายของก๊าซนี้ในเมือกในอวัยวะดังกล่าว ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อนขึ้น (นิรนาม, 2548)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อได้รับในปริมาณน้อยจะรู้สึกแสบตา น้ำตาไหล แสบจมูก ร้อนคอ ไอ ปวดศีรษะ ชีพจรเต้นเร็ว ความดันลดลง หายใจได้ไม่เต็มที่ และหมดสติ โดยทั่วไปเมื่อสูดก๊าซนี้เข้าไประยะหนึ่ง ประสาทจะชา ทำให้ไม่ได้กลิ่น ถ้าสูดเข้าไปมาก ๆ จะตายภายใน 2-3 นาที เพราะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไปรวมตัวกับเม็ดเลือด ทำให้ร่างกายไม่สามารถใช้ออกซิเจนได้ (พิษณุ, 2541)

ผลกระทบรุนแรงของการสัมผัสก๊าซโอโซนจะเกิดกับระบบทางเดินหายใจ สำหรับเด็กที่สัมผัสกับก๊าซนี้ในระดับความเข้มข้นสูง ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ เป็นเวลานาน 2 วันติดต่อกัน จะมีความเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยด้วยโรคระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

ก๊าซพวกอัลดีไฮด์ และคีโตน ซึ่งเกิดจากการสันดาปสารไฮโดรคาร์บอน พบว่าบางตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น สารไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) พวกเมทิลคอแลนทรีน (methylcholanthrene) บางตัวเป็นอันตรายต่อผิวหนัง (พิษณุ, 2541)

สารประกอบฮาโลเจน (halogent) ที่พบในอุตสาหกรรมเครื่องเย็น ได้แก่ คลอรีน ฟลูออไรด์ โบรมีน ก๊าซคลอรีน รวมทั้งไอของไฮโดรเจนคลอไรด์ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ และเยื่อตาอักเสบ (พิษณุ, 2541)

ก๊าซแอมโมเนียหากได้รับเข้าไปจะเกิดการระคายต่อเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้แสบตา ทำลายระบบทางเดินหายใจ (พิษณุ, 2541)

2.1.2 ผลกระทบต่อความรู้สึกและความพึงพอใจหรือความรำคาญที่เกิดจากปัญหามลพิษทางอากาศ ทำให้ความสามารถในการมองเห็นลดลงเนื่องจากฝุ่นละออง นอกจากนี้

ยังมีปัญหาเกี่ยวกับกลิ่นรบกวนซึ่งมีผลกระทบทางด้านจิตใจ และโยงไปถึงปัญหาสุขภาพอย่างอื่นได้ (นิรันดร์, 2539)

2.2 ผลกระทบต่อพืช

ผลกระทบของมลพิษทางอากาศต่อพืชมีทั้งชนิดเฉียบพลันและชนิดเรื้อรัง ถ้าเป็นแบบเฉียบพลัน พืชที่รับสารพิษในระดับความเข้มข้นสูงจะตายทันที เช่น ถ้าพืชได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ จะทำให้การสังเคราะห์แสงและการหายใจของพืชลดลงหรือเสื่อมลง เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะไปทำลายคลอโรฟิลล์ซึ่งใช้ในการสังเคราะห์แสงและทำลายปากใบของพืช (งามจิตต์ และคณะ, 2544) แต่หากพืชได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ในระยะเวลานานต่อเนื่องกันไป จะทำให้พืชไม่เจริญเติบโต ผลผลิตลดลง สีของต้นหรือใบเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น (นิรันดร์, 2539)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังช่วยเพิ่มความเป็นกรดในดิน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอลูมิเนียมออกมามาก ส่งผลให้มีแคลเซียมและแมกนีเซียมลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารที่พืชจะดูดไปใช้ได้ (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

Kress และ Skelly (1982) อ้างโดย Treshow และ Anderson (1989) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนร่วมกับก๊าซโอโซนที่มีต่อความสูงของต้นไพน์ (Virginia pine และ loblolly pine) พบว่าเมื่อให้ไนโตรเจนไดออกไซด์ 100 $\mu g\ kg^{-1}$ ร่วมกับโอโซน 100 $\mu g\ kg^{-1}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 28 วัน จะทำให้ความสูงของต้นสนทั้งสองชนิดลดลง

Runeckles et al. (1978) อ้างโดย Treshow และ Anderson (1989) ทดลองกับข้าวสาลีและหัวผักกาดขาว โดยสร้างก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วงแรกของการเจริญเติบโตของพืช แล้วจึงสร้างก๊าซโอโซนในช่วงท้ายของการทดลอง เปรียบเทียบกับสถานการณ์จริงที่เกิดขึ้นในเขตชนบท พบว่า เมื่อข้าวสาลีหรือหัวผักกาดขาวได้รับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ 100 $\mu g\ kg^{-1}$ ตั้งแต่เวลา 9.00–12.00 น. พืชจะมีความไวต่ออันตรายอันเกิดจากผลของก๊าซโอโซน 100 $\mu g\ kg^{-1}$ ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 12:00–18:00 น. และ Okano et al. (1984) อ้างโดย Treshow และ Anderson (1989) ยังได้กล่าวอีกว่า อิทธิพลร่วมระหว่างโอโซนกับไนโตรเจนไดออกไซด์มีอันตรายต่อพืชมากกว่าอิทธิพลร่วมระหว่างโอโซนกับ $^{13}CO_2$

Runeckles และ Palmer (1987) อ้างโดย Treshow และ Anderson (1989) ทำการทดลองผสมก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ 2.0 mg kg^{-1} และ โอโซน 2,000 μg kg^{-1} พบว่าความสามารถในการตรึง $^{13}CO_2$ ของใบลดลง และมีการดูดซึม $^{13}CO_2$ แบบกระจายตัวเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซใดก๊าซหนึ่ง ปริมาณการเคลื่อนย้าย $^{13}CO_2$ ที่ดูดซึมได้ไปยังรากและลำต้นลดลงถึง 85% และ 80% ตามลำดับ

นอกจากนี้สารประกอบฮาโลเจนที่พบในอุตสาหกรรมเครื่องเย็นจำพวกฟลูออไรด์หากอยู่ในรูปของ HF หรือ SiF จะทำความเสียหายต่อพืช (พิษณุ, 2541)

2.3 ผลกระทบต่อสัตว์

ผลกระทบที่เกิดจากมลพิษทางอากาศต่อสัตว์จะคล้ายกับที่เกิดในพืช คือ ถ้าได้รับก๊าซพิษในระดับความเข้มข้นสูงจะทำให้ถึงตายได้ แต่จะแตกต่างจากของมนุษย์เพราะอันตรายของก๊าซมลพิษต่อสัตว์ส่วนใหญ่เกิดในระบบทางเดินอาหารมากกว่าระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากโดยมากแล้วสัตว์ต้องกินหญ้าหรือพืชที่ปนเปื้อนสารมลพิษเข้าไป (นิรันดร์, 2539)

มีรายงานว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะไปเพิ่มความเป็นกรดของดิน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอลูมิเนียมออกมามากกว่าปกติ เมื่อแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำและสัตว์ที่บริโภคน้ำเข้าไป (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

นอกจากนี้สารประกอบฮาโลเจนที่พบในอุตสาหกรรมเครื่องเย็นจำพวกฟลูออกไรด์หากอยู่ในรูปของ HF หรือ SiF จะทำพิษต่อสัตว์ที่กินพืชซึ่งได้รับสารพวกนี้เข้าไป (พิษณุ, 2541)

2.4 ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

ก๊าซมลพิษยังส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้โลกร้อนขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนในรูปของแสงแดดที่ส่องมายังโลกไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้หมด จนทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ประมาณร้อยละ 30 ของพลังงานที่เดินทางมาสู่โลกได้สะท้อนกลับไปสู่ห้วงอวกาศ แต่อีกร้อยละ 70 ถูกดูดซับไว้โดยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งก๊าซนี้ที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน และไนตรัสออกไซด์ (สวัสดิ์, 2543)

โดยทั่วไปก๊าซเรือนกระจกในธรรมชาติมีปริมาณรวมทั้งสิ้นไม่ถึงร้อยละ 1 ของบรรยากาศ ซึ่งปริมาณดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้โลกอบอุ่นได้ แต่กิจกรรมของมนุษย์มากกว่าร้อย

ละ 60 กลับเพิ่มปริมาณก๊าซเหล่านี้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน น้ำมัน และ ก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งการตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปี พ.ศ. 2534 มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดถึง 26.4 พันล้านตัน นักวิทยาศาสตร์ประมาณว่าการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 10,000 ปี ก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรมมีไม่ถึงร้อยละ 10 และธรรมชาติสามารถปรับตัวให้สมดุลกับการเปลี่ยนแปลงนั้นได้ แต่ในช่วง 200 ปีที่ผ่านมา ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 และยังคงเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ในทุก ๆ 20 ปี (สวัสดิ์, 2543)

การเกษตรโดยเฉพาะการปลูกข้าวในนาที่มีน้ำขังและการปศุสัตว์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และยังทำให้เกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์อีกด้วย โดยก๊าซนี้เพิ่มขึ้นร้อยละ 15 จากการทำการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้การฝังกลบขยะ การทำเหมืองถ่านหิน และการผลิตก๊าซธรรมชาติก็ปล่อยก๊าซมีเทนเช่นกัน คาดว่าประมาณร้อยละ 15-20 ของก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นเกิดจากก๊าซมีเทน และประมาณร้อยละ 20 เกิดจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซไนตรัสออกไซด์ CFCs และ โอโซน ซึ่งควันจากท่อไอเสียรถยนต์จะเป็นตัวปล่อยโอโซนออกมา นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปอุตสาหกรรมจะปล่อยสารฮาโลคาร์บอน (CFCs, HFCs, PFCs) ซึ่งก๊าซเหล่านี้เมื่อได้รับพลังงานสูงจากโฟตอนของรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ ทำให้สารประกอบแตกตัวให้คลอรีนหรือโบรมีนอะตอมอิสระ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาคะตาไลซิสกับอะตอมออกซิเจนจากโมเลกุลโอโซน เป็นการทำลายชั้นโอโซนจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการดูดซับพลังงานของบรรยากาศ (สวัสดิ์, 2543; กรมอุตุนิยมวิทยา, 2549)

นักวิทยาศาสตร์ได้ประมาณการณ์ไว้ว่าที่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรขึ้นไปฤดูหนาวจะสั้นลงและมีความชื้นสูงขึ้น ส่วนฤดูร้อนจะยาวนานขึ้น อาจทำให้พื้นดินบางแห่งกลายเป็นทะเลทราย ในเขตร้อนอาจมีพายุบ่อยครั้งและรุนแรง บริเวณขั้วโลกจะเกิดการละลายของหิมะ ทำให้ปริมาณน้ำในทะเลและมหาสมุทรเพิ่มขึ้น (ใจชาย, 2544)

จากการศึกษาการเพิ่มของอุณหภูมิในรอบ 1 ปี พบว่า ภายในปี พ.ศ.2643 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 องศาเซลเซียส ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นประมาณ 15-95 เซนติเมตร นอกจากนั้นยังมีผลต่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโลกและปริมาณน้ำฝน คือ คาดว่าจะมีป่าไม้ประมาณ 1 ใน 3 ถึง 1 ใน 7 ของโลกที่จะมีการเปลี่ยนแปลงพรรณไม้ที่สำคัญไป (สวัสดิ์, 2543)

นอกจากนี้ผลกระทบของก๊าซมลพิษยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรดด่างของน้ำฝน หรือที่เรียกว่า ฝนกรด ดังจะได้กล่าวถึงในลำดับต่อไป

2.5 ผลกระทบต่อวัสดุสิ่งของและทรัพย์สิน

สารมลพิษในอากาศสามารถทำให้น้ำฝนที่ตกลงมามีสภาพเป็นกรดมากขึ้น ทำให้เกิดการกัดกร่อน สึกหรอ ของวัสดุสิ่งของต่างๆ เช่น ฝุ่นละอองต่างๆ ทำให้เกิดความสกปรก สิ่งของที่ทำจากโลหะ อิฐ หิน เส้นใย เครื่องนุ่งห่ม เสื่อมคุณภาพลง หากต้องสัมผัสกับสารมลพิษ (นิรันดร์, 2539; ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

พบว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูน หรือหินทรายก่อตัวเป็นยิปซัมเกาะติดอยู่บนหิน เป็นเหตุให้พื้นผิวของหินแตกเป็นแผ่นเล็กๆ บางๆ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังทำให้เกิดเกลือในหินซึ่งต่อมาอาจขยายหรือหดตัวลง ทำให้หินสึกกร่อนได้ นอกจากนี้รอยเปื้อนบนกระจกหน้าต่างตามอาคารต่างๆ ในยุโรป เช่น มหาวิหารเวสต์มินสเตอร์ในกรุงลอนดอน มหาวิหารของเมืองโคโลญน์ในเยอรมนี ป้อมปราการอะโครโปลิสใน กรุงเอเธนส์ สนามกีฬาโคลีเซียมในกรุงโรม และมหาวิหารของเมืองแรงซ์ในฝรั่งเศส เชื่อว่าเป็นผลมาจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

3. <u>ก๊าซพิษที่เป็นสาเหตุให้เกิดฝนกรด</u>

3.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและรส เกิดจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน เบากว่าอากาศเพียงเล็กน้อยและละลายน้ำได้บ้าง ก๊าซนี้ดูดซึมรังสีอิเล็กโทรแมกเนติกในระยะของรังสีอินฟาเรด โดยมีจุดศูนย์กลางการดูดซึมที่ความยาวคลื่น 4.67 ไมครอน (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2536) ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 0, 25 และ 37 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเป็น 0.0354, 0.0214 และ 0.0183 vol vol^{-1} ตามลำดับ (Penney, 2002)

คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารมลพิษทางอากาศที่แพร่กระจายอยู่ทั่วไปมากที่สุด เฉลี่ยทั่วโลก 2,600 ล้านตันต่อปี การกระทำของมนุษย์ปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณร้อยละ 60 ของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แพร่กระจายทั่วโลก หรือประมาณ 1,600 ตันต่อปี ซึ่งมาจากการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง การเผาป่า การเผาทุ่งหญ้า และการออกซิเดชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งส่วนใหญ่เป็นมีเทน (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

ในปี พ.ศ.2540 กรมควบคุมมลพิษดำเนินการตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในเขตกรุงเทพมหานคร พบว่าค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (30 mg kg^{-1}) และค่าสูงสุดเฉลี่ย 1 ชั่วโมง เกือบทุกสถานีต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเช่นกัน มีเพียงสถานีกรมอุตุนิยมวิทยาบางนาที่พบว่าสูงเกินค่ามาตรฐาน (36.6 mg kg^{-1}) (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

ในเขตพื้นที่ต่างจังหวัด พบว่า ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง และค่าสูงสุดเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปี พ.ศ.2540 ยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานในทุกๆ สถานี และมีแนวโน้มลดลงในทุกสถานี (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

เนื่องจากระดับมลพิษในบรรยากาศทั่วไปไม่เพิ่มขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าอาจมีการกำจัดก๊าซนี้โดยการเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนในบรรยากาศ หรือไม่เช่นนั้น ดิน พืช และพืชผิวน้ำอาจลดระดับมลพิษนี้ได้โดยการนำไปใช้ในกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์บางชนิดและการสังเคราะห์แสงของพืช (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2536)

3.2 คาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ติดไฟ ละลายน้ำได้ 1 เปอร์เซ็นต์ จุดเดือด -78.5 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -56.6 องศาเซลเซียส (นิรนาม, 2548) ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ประมาณ 0.90 vol vol^{-1} (Anonymous, 2006) เกิดจากการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ การสันดาปเครื่องยนต์ การหายใจของพืชและสัตว์ การระเบิดของภูเขาไฟ (Bruce, 1990)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ความเข้มข้นที่พบอยู่ในปี 2548 สูงถึง 380 mg kg^{-1} มีรายงานจาก Thomas Stocker หัวหน้าทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัยเบิร์น ในสวิตเซอร์แลนด์ ระบุว่า ในยุคก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรมมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นเพียง 278 mg kg^{-1} แต่ความเข้มข้นในปี 2548 สูงกว่าระดับสูงสุดที่พบในช่วง 650,000 ปีที่ผ่านมาถึง 27 เปอร์เซ็นต์ (เนรามิต, 2549)

นอกจากนี้ JMA-WMO (2000) พบอัตราการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก 1.5 mg kg^{-1} ระหว่างปี 1983-1997 อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มระหว่างปีต่างๆ ได้ผันแปรไปอย่างมาก โดยปี 1983 1987/1988 1994/1995 และ 1997 สัมพันธ์กับเหตุการณ์ EI Nino ทางซีกโลกใต้ ซึ่งรุนแรงมากในปี 1997/1998 ทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงเป็นพิเศษในปี

1998 ที่สถานี Mauna Loa ในฮาวาย สหรัฐอเมริกา และ Ryori ในญี่ปุ่นมีอัตราเพิ่มต่ำสุดในปี 1992 โดยมีอัตราเพิ่มเป็นลบในละติจูดกลางซีกโลกเหนือ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิต่ำทั่วโลกและภูเขาไฟปินาตุโบระเบิดในปี 1991

เนื่องจากระดับมลพิษในบรรยากาศทั่วไปไม่เพิ่มขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าอาจมีการกำจัดก๊าซนี้โดยการเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนในบรรยากาศ หรือไม่เช่นนั้น ดิน พืช และพืชผิวน้ำอาจลดระดับมลพิษนี้ได้ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2536)

3.3 ออกไซด์ของซัลเฟอร์

ซัลเฟอร์ที่พบในบรรยากาศอยู่ในรูปสารประกอบ 3 ชนิดคือ SO_2, H_2S และ SO_4^{2-} ในรูปของละออง (aerosol) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ติดไฟ มีกลิ่นกรด ฉุน แสบจมูก จุดเดือด -10 องศาเซลเซียส (สิทธิชัย, 2541; ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549) ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 79.79 vol vol^{-1} (Air Liquide Group, 2006 a)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่พบในบรรยากาศมาจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งใหญ่ คือ ครึ่งหนึ่งมาแหล่งกำเนิดธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ และอีกครึ่งหนึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิง (fossil fuel) เช่น ถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียม (สิทธิชัย, 2541; งามจิตต์ และคณะ, 2544)

ในปัจจุบันการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วโลกมีประมาณ 294 ล้านตันต่อปี โดยเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ 160 ล้านต้น (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

จากการตรวจวัดของกรมอนามัยปี พ.ศ.2540 ใน 3 สถานี ได้แก่ ลาดพร้าว ประดิพัทธ์ และศูนย์ฝึกและสาธิตบริการอาชีวอนามัย (สำโรง) พบค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง อยู่ระหว่าง 59-158 $\mu g\ m^{-3}$ ต่ำกว่ามาตรฐานของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศเฉลี่ย 24 ชั่วโมง (300 $\mu g\ m^{-3}$) ค่าเฉลี่ย 1 ปีของระดับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 4.51-5.44 $\mu g\ m^{-3}$ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วไปเฉลี่ย 1 ปี (100 $\mu g\ m^{-3}$) และพบว่าค่าเฉลี่ย 1 ปีนี้มีแนวโน้มลดลงในทุกสถานี (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

กรมอนามัยได้ตรวจวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ระหว่างปี พ.ศ.2535-2539 พบว่า ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ค่าสูงสุดเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ในแต่ละปีสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2,241-3,418 $\mu g\ m^{-3}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษในปี พ.ศ.2540 ที่ได้ตรวจค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในต่างจังหวัด พบว่าต่ำกว่ามาตรฐานอย่างมาก คืออยู่ในช่วง 0.7-3.9 $\mu g\ kg^{-1}$ และมีแนวโน้มลดลง (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

วิธีควบคุมหรือลดการแพร่กระจายของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีหลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุด คือ การใช้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์ต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่หาได้ยากมาก อีกทางเลือกหนึ่งคือ ใช้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์สูงต่อไป แต่ต้องทำให้ถ่านหินและน้ำมันบริสุทธิ์จากซัลเฟอร์เสียก่อน ซึ่งการสกัดซัลเฟอร์จากเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้จะช่วยลดมลพิษของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลง การพ่นหินปูนลงในเตาเผาระหว่างการเผาไหม้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนซัลเฟอร์เป็นยิปซัมได้ หรือการดูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากปล่องควันหลังการเผาไหม้ ตลอดจนกระบวนการขจัดซัลเฟอร์จากปากปล่องควันระบายก๊าซ (flue gas desulphurization, FGD) โดยการติดตั้งเครื่องกรองที่บริเวณดังกล่าวก็สามารถช่วยได้เช่นกัน (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

3.4 ออกไซด์ของไนโตรเจน

ออกไซด์ของไนโตรเจนประกอบด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนไตรออกไซด์ (N_2O_3) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N_2O_4) และไดไนโตรเจนเพนตอกไซด์ (N_2O_5) มีเพียง 2 ชนิดเท่านั้นคือ ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ไนตริกออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่น จุดเดือด -152 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ประมาณ 0.073 $vol\ vol^{-1}$ (Aldrich Chemical Co. Inc., 2001) ส่วนไนโตรเจนไดออกไซด์มีสีน้ำตาล มีกลิ่นฉุน ถ้าในอากาศมีความเข้มข้นสูงเกิน 0.1 $mg\ kg^{-1}$ จะทำให้ได้กลิ่นนี้ มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ จุดหลอมเหลว -11.2 องศาเซลเซียส สามารถละลายน้ำได้ต่ำ แต่จะค่อยๆ ละลาย (พิษณุ, 2541; สิทธิชัย, 2541; Air Liquide Group, 2006 b; Branch Environmental Corporation, 2005)

แหล่งกำเนิดออกไซด์ของไนโตรเจนมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ฟ้าแลบ ฟ้าฝ่า ภูเขาไฟระเบิด กระบวนการของจุลินทรีย์ในดิน หรืออาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมการทำกรดไนตริก กรดกำมะถัน การชุบโลหะ และการทำวัตถุ

ระเบิด เป็นต้น (สิทธิชัย, 2541; ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

อย่างไรก็ตาม ก๊าซทั้งสองนี้เกิดจากธรรมชาติมากกว่าการกระทำของมนุษย์ การเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์มีอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ก๊าซไนตริกออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศเกิดเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์และออกซิเจน ในทางตรงกันข้าม แสงแดดจะทำให้ไนโตรเจนไดออกไซด์แตกตัวทำปฏิกิริยาย้อนกลับ (ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

มีการคาดคะเนกันว่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ในปี ค.ศ.1980 มีถึง 150 ล้านตันต่อปี พบว่าออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ในเขตอุตสาหกรรมแถบยุโรปและอเมริกาเหนือมีจำนวนมากกว่าที่เกิดจากธรรมชาติ 5-10 เท่า (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

ในยุโรปตะวันตก ออกไซด์ของไนโตรเจนจากการกระทำของมนุษย์มาจากยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์ประมาณร้อยละ 30-50 และอีกร้อยละ 30-40 เกิดจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก ในปี ค.ศ.1989 ร้อยละ 40 ของการแพร่กระจายออกไซด์ของไนโตรเจนในสหรัฐอเมริกาเกิดจากยานยนต์ และในปี ค.ศ.1985 ร้อยละ 64 ของการแพร่กระจายออกไซด์ของไนโตรเจนในประเทศแคนาดาก็มาจากยานยนต์เช่นกัน (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

จากการตรวจวัดของกรมอนามัยในปี พ.ศ.2540 พบว่าใน 3 สถานี ได้แก่ ลาดพร้าว ประดิพัทธ์ และศูนย์ฝึกอบรมและสาธิตบริการอาชีวอนามัย (สำโรง) พบค่าเฉลี่ย 1 ปีของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 6.21-11.86 $\mu g\ m^{-3}$ และค่าสูงสุดเฉลี่ย 24 ชั่วโมง อยู่ระหว่าง 32-140 $\mu g\ m^{-3}$ ซึ่งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เฉลี่ย 24 ชั่วโมง (150 $\mu g\ m^{-3}$) แนวโน้มของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วงระหว่างปี พ.ศ.2532-2536 พบว่า ในปี พ.ศ.2534 ค่าสูงสุดเฉลี่ย 24 ชั่วโมง สูงเกินค่ามาตรฐานทั้งที่สถานีสำโรงและลาดพร้าว และในปี พ.ศ.2536 พบที่สถานีประดิพัทธ์ (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

ในส่วนภูมิภาคยังไม่พบพื้นที่ที่มีค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เกินค่ามาตรฐาน และค่าสูงสุดเฉลี่ย 1 ชั่วโมง พบว่า มีเพียงสถานีโรงเรียนหน้าพระลาน จ.สระบุรีเพียงแห่งเดียวที่มีค่าเกินมาตรฐาน (200 $\mu g\ kg^{-1}$) และในปี พ.ศ.2538-2540 พบว่า ปี พ.ศ. 2539 ลดลงจากปี พ.ศ.2538 มาก แต่ในปี พ.ศ.2540 ไม่แตกต่างจากปี พ.ศ.2539 และกลับ

พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในจังหวัดสระบุรี (โครงการตำรา สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2549)

ในปี ค.ศ.1974-1983 ปริมาณการแพร่กระจายของออกไซด์ของไนโตรเจนในญี่ปุ่นลดลงร้อยละ 21 เนื่องจากญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่กำหนดมาตรฐานสำหรับออกไซด์ของไนโตรเจนจากแหล่งกำเนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ ใน ค.ศ.1986 ญี่ปุ่นจัดตั้งอุปกรณ์กำจัดไนโตรเจนที่ปล่องควันจำนวนกว่า 320 เครื่องในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

ช่วงปลายทศวรรษ 1970 เริ่มมีการผลิตอุปกรณ์ฟอกไอเสียโดยการเร่งปฏิกิริยาของไอเสีย (catalytic converter) ในยานยนต์เป็นครั้งแรก (งามจิตต์ และคณะ, 2544) และเนื่องจากไนโตรเจนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ต่ำ แต่จะค่อยๆ ละลาย ดังนั้นโดยเฉลี่ยจะพบไนโตรเจนไดออกไซด์อยู่ในบรรยากาศได้เพียง 3 วัน แล้วจะถูกขจัดออกโดยรวมกับละอองน้ำในอากาศหรือน้ำฝน เกิดเป็นกรดไนตริกซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดฝนกรดต่อไป (สิทธิชัย, 2541; ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2549)

3.5 มีเทน

มีเทนเป็นก๊าซที่เบากว่าอากาศ มีความหนาแน่นของก๊าซที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 0.68 kg m^{-3} จุดหลอมเหลว -182.5 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ 0.054 vol vol^{-1} (Air Liquide Group, 2006 c) มีเทนจัดเป็นก๊าซเรือนกระจก สามารถผสมอยู่ในบรรยากาศได้นานถึง 11 ปี แหล่งที่มาที่สำคัญคือ ภาคเกษตรกรรม เช่น นาข้าว ซึ่งการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของดินนาและคุณสมบัติของดินนา พันธุ์ข้าว สภาวะอากาศ กิจกรรมที่ทำในการเพาะปลูก การจัดการน้ำและปุ๋ย เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดจากปศุสัตว์ และการฝังกลบขยะ (สิรินทรเทพ, 2542)

การปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวของโลกอยู่ในช่วง 25-150 เตตระกรัมต่อปี และเพิ่มขึ้นในอัตรา 0.8-1 เปอร์เซ็นต์ต่อปี โดยประเทศที่พัฒนาแล้วทางโลกตะวันตกอ้างถึงประเทศที่ปลูกข้าวแถบเอเชียอาคเนย์ว่ามีการปล่อยก๊าซมีเทนในปริมาณสูง (สิรินทรเทพ, 2542)

JMA-WMO (2000) กล่าวว่า ระดับมีเทนได้เพิ่มขึ้นตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 ความเข้มข้นทั่วโลกอยู่ที่ระดับ 1,749 μg kg^{-1} ในปี 1998 ความเข้มข้นรายปีมีค่าสูงสุดในละติจูดทาง

ซีกโลกเหนือมากที่สุดและลดลงมาทางละติจูดซีกโลกใต้ ความเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่อยู่ทางซีกโลกเหนือ อัตราเพิ่มทั่วโลก 9 $\mu g\ kg^{-1}$ ต่อปี เฉลี่ยจากปี 1984-1998 ลดลงจากทศวรรษที่ 1980-1990

3.6 ฮาโลคาร์บอน

ฮาโลคาร์บอนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีพิษ ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี (สวัสดิ์, 2543) เป็นก๊าซสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนรวมตัวกับฮาโลเจน เช่น ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน หรือไอโอดีน ฮาโลคาร์บอนประกอบด้วย คลอโรฟลูออโรคาร์บอน และฮาลอน เนื่องจากคลอโรฟลูออโรคาร์บอนมีด้วยกันหลายชนิดจึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้แตกต่างกัน เช่น สาร Freon 113 มีความสามารถในการละลายน้ำได้ 0.17 $vol\ vol^{-1}$ (U.S. Environmental Protection Agency, 1994) ส่วนฮาลอนก็มีด้วยกันหลายชนิดจึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่างกัน เช่น Halon 1211 ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ Halon 1301 มีความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8 $vol\ vol^{-1}$ (Alternative Refrigerant Distributors, Inc., 2006) สารเหล่านี้เริ่มสังเคราะห์ครั้งแรกในปี ค.ศ.1928 จากนั้นมามีการใช้แพร่หลาย เช่น เป็นสารผลักดันในกระป๋องสเปรย์ โฟม เครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศ และเป็นสารชะล้างในอุตสาหกรรมอิเลกทรอนิกส์ (สวัสดิ์, 2543)

ระดับของฮาโลคาร์บอน เช่น CFCs ต่างๆ ได้เพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ในทศวรรษที่ 1970 แต่ปัจจุบันได้หยุดการเพิ่มขึ้นแล้วเนื่องจากกฎหมายที่ห้ามการผลิตและปล่อยสารทำลายโอโซน (JMA-WMO, 2000)

สาร CFCs ต่างๆ จะถูกสลายตัวโดยแสงอาทิตย์ช่วงอัลตราไวโอเลตในชั้นสตราโตสเฟียร์ ทำให้ช่วงชีวิตที่ยาวสามารถสั้นลงได้ เช่น HCFCs และ เมธิลคลอโรฟอร์ม ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลในชั้นโทรโพสเฟียร์ ทำให้มีช่วงชีวิตสั้นลง (JMA-WMO, 2000)

ก๊าซมลพิษเหล่านี้จัดว่าเป็นก๊าซอันตรายซึ่งพบได้ทั่วโลก แต่ที่พบมากจะเกิดในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากยังขาดความพร้อมในการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือป้องกันกำจัดสารมลพิษเหล่านี้

สำหรับประเทศไทยที่กำลังพัฒนาเป็นประเทศอุตสาหกรรมใหม่ มีความต้องการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลของธนาคารแห่งประเทศไทยประมาณความต้องการ

ใช้ถ่านหินในไทยเพิ่มจาก 7.6 ล้านต้นในปี 1988 เป็น 38 ล้านต้นในปี 2000 และ แหล่งที่ใช้มาก คือ โรงไฟฟ้า พบว่ามลพิษที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพิ่มจาก 178,000 ตันในปี 1979 เป็น 245,000 ตันในปี 1988 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ลิกไนต์ที่มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์สูง และมีการใช้น้ำมันดีเซลเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีการขยายตัวในส่วนของการคมนาคมขนส่ง ประมาณว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในประเทศไทยประมาณ 45% มาจากโรงไฟฟ้า 26% มาจากโรงงานอุตสาหกรรม และ 23% มาจากการขนส่ง (Kritiporn, 1990)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกปล่อยจากแหล่งใหญ่ 2 แหล่ง คือ โรงไฟฟ้าในภาคเหนือ และโรงงานอุตสาหกรรมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทยประมาณการว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไทยจะเพิ่มจาก 444,000 ตันในปี 1986 เป็น 2,200,000 ตันในปี 2001 และเป็น 3,100,000 ตันในปี 2011 ส่วนไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มจาก 311,000 ตันในปี 1986 เป็น 1,100,000 และ 2,000,000 ตันในปี 2001 และ 2011 ตามลำดับ และถ้าไม่มีการควบคุม โรงไฟฟ้าแม่เมาะจะปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 1,600,000 ตัน และไนโตรเจนออกไซด์ประมาณ 230,000 ตันในปี 2011 (Kritiporn, 1990)

4. <u>ฝนกรด</u>

4.1 นิยาม

ฝนกรด (Acid rain) หมายถึง น้ำฝนที่มี pH ต่ำกว่า 5.6 (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Simachaya, 1993) ซึ่งผ่านการชะล้างเอาก๊าซในบรรยากาศ อันได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ 340 mg kg^{-1} อนุมูลซัลเฟตและไนเตรตซึ่งมาจากกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก โดยมีแหล่งกำเนิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิล ซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากันเองกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ ออกไซด์ทั้งสองชนิดถูกเติมออกซิเจนในบรรยากาศเกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ และถูกดูดซับโดยความชื้นในบรรยากาศเกิดเป็นกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก หรืออาจเกิดการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์เข้าไปในเมฆ และเกิดการเติมออกซิเจนแล้วเปลี่ยนเป็นกรดในภายหลัง จากนั้นเมื่อละลายในน้ำฝนทำให้ความเป็นกรดในน้ำฝนสูงกว่าปกติ และตกลงมาเกิดเป็นฝนกรด (นักศึกษาระดับปริญญาโท, 2546) โดยทั่วไปประมาณ 70% ของฝนกรดเป็นกรดซัลฟูริก และ 30% เป็นกรดไนตริก (Simachaya, 1993)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากโรงไฟฟ้า น้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์ ก๊าซหุงต้ม ทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนและกรดกำมะถันกระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศ ออกไซด์เหล่านี้สามารถละลายกับไอน้ำในบรรยากาศและเปลี่ยนรูปเป็นกรดไนตริกและกรดกำมะถันได้ กรดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ไอน้ำในบรรยากาศมีสภาพเป็นกรดมากกว่าสภาพที่ควรเป็นโดยธรรมชาติ (ศูนย์การศึกษานอกโรงเรียน, 2546)

ในชั้นบรรยากาศที่ถูกมนุษย์ปล่อยสิ่งสกปรกไปสะสมไว้ เช่น การที่มนุษย์ทำให้เกิดควัน (smoke) ซึ่งเป็นอนุภาคของถ่านหรือคาร์บอน เป็นผงหรือเขม่าเล็ก ๆ ที่เหลือจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ซึ่งอนุภาคนี้จะพบในควันดำ ส่วนควันขาวจะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมันเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ (นิรันดร์, 2539; ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมอนุภาคสิ่งแวดล้อม, 2549) เขม่า (soot) เป็นอนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กของคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของวัสดุพวกที่เป็นคาร์บอนและมีสารพวกทาร์ (tar) รวมอยู่ด้วย ละออง (mist) เป็นของเหลวซึ่งเกิดจากการควบแน่นของไอหรือก๊าซต่าง ๆ หรือเกิดจากการแตกตัวของของเหลวจากกระบวนการบางอย่าง เช่น การพ่น การฉีดของเหลวเข้าไปในอากาศ ไอเสียจากเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้ ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้แล้วบางส่วน คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารละออง ออกไซด์ของไนโตรเจน ก๊าซพวกอัลดีไฮด์ และคีโตน (นิรันดร์, 2539; พิษณุ, 2541) หรือการปลดปล่อยก๊าซจากโรงงานอุตสาหกรรม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน จะไปรวมตัวกับน้ำในบรรยากาศ ทำให้เกิดกรดขึ้นและกลายเป็นฝนกรดในที่สุด (ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2546)

ฝนกรด คือ หยาดน้ำฟ้าของมลพิษพวก SO_2 หรือ SO_3 และ NO_2 หรือ HNO_3 ที่ละลายอยู่ในเมฆและเม็ดฝน แล้วเกิดการสร้างตัวเป็นกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก แต่ถึงอย่างไรกระบวนการเกิดฝนกรดยังสามารถเกิดได้จากก๊าซที่เป็นมลพิษตัวอื่น ๆ ได้อีก เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือก๊าซโอโซน เป็นต้น (Environmental Resources Limited, 1983)

Robert Angus Smith (1872) อ้างโดย Wellburn (1990) กล่าวว่า ฝนกรดไม่สามารถแยกพิจารณาจากมลพิษทางบรรยากาศได้ ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซต่าง ๆ จะเป็นตัวทำให้เกิดความเป็นกรดบนพื้นผิวโลก และปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับน้ำในบรรยากาศจะนำความเป็นกรดมาสู่พื้นผิวโลก โดยมากับหยาดน้ำฟ้า

ฝนกรดเกิดจากการที่มีอนุมูลของกรดต่าง ๆ เช่น กรดกำมะถัน กรดไนตริก หรือแม้แต่กรดอินทรีย์ต่าง ๆ เจือปนอยู่ในน้ำฝน โดยปกติน้ำฝนที่บริสุทธิ์จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนอยู่

ทำให้เกิดเป็นกรดคาร์บอนิคขึ้น จึงเป็นเหตุให้น้ำฝนมีค่า pH เป็น 5.6 ส่วนกรดอื่นๆ นอกเหนือจากกรดคาร์บอนิกอ่อนๆ ถือว่าเป็นสารที่เกิดจากการกระทำนอกเหนือธรรมชาติ เช่น การที่มนุษย์ใช้เชื้อเพลิงที่มีสารกำมะถันเจือปน (น้ำมัน, ถ่านหิน) เมื่อเผาไหม้ก็จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งอาจจะทำปฏิกิริยาในอากาศเปลี่ยนเป็นอนุมูลของกรดกำมะถัน และการเผาไหม้เชื้อเพลิงก็ให้ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งอาจเปลี่ยนเป็นอนุมูลของกรดไนตริกได้เช่นกัน ฝนกรดมักเกิดในทิศใต้ลมจากแหล่งกำเนิด เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โดยทิศทางลมที่ระดับความสูง 925 มิลลิบาร์ (ความสูงประมาณ 750 เมตรจากพื้นดิน) เป็นระดับที่สามารถใช้ทำนายทิศทางของฝนกรดได้แม่นยำที่สุด (แสงสันต์, 2530)

มีหลายประเทศทำการศึกษาถึงสภาพน้ำฝนที่คาดว่าจะเป็นฝนกรดไว้ดังนี้

ประเทศจีนเริ่มสำรวจความเป็นกรดและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำฝนในปี 1970 ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าทางตอนใต้ของจีนมีค่า pH ของน้ำฝนประมาณ 5.6 และค่าเฉลี่ยบางพื้นที่ต่ำถึง 4.0 ส่วนทางเหนือมีค่า pH ของน้ำฝนประมาณ 6.0 ทั้งที่ความจริงการเผาไหม้ถ่านหินส่วนใหญ่เกิดในพื้นที่นี้ และความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในน้ำฝนและระดับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหลายเมืองของพื้นที่นี้มักสูงกว่าทางตอนใต้ เนื่องจากทางเหนือบริเวณตอนกลางเป็นทะเลทรายมีด่าง (alkaline) สูง ดินเกลือจะช่วยเพิ่มความเป็นกลางของบรรยากาศ (Bhatti et al., 1990)

ในปี 1983 สถาบันสิ่งแวดล้อมญี่ปุ่น (Environmental Agency, JEA) ได้ทำการวัดการสะสมของกรดในเอเชียตะวันออกเปรียบเทียบกับอเมริกาเหนือและยุโรป จะเห็นว่าทั้งอเมริกาเหนือและยุโรปมีความเป็นกรดของน้ำฝนใกล้เคียงกับในเอเชียตะวันออก โดยพบว่าระดับ pH ของน้ำฝนในเอเชียตะวันออกมีค่าอยู่ในช่วง 4.3-5.3 ส่วนในยุโรปและอเมริกาเหนือมีค่า pH ของน้ำฝนอยู่ในช่วง 4.4-6.5 และ 4.2-5.6 ตามลำดับ (Carmichael and Arndt, n.d.)

การศึกษาความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในน้ำฝนในพื้นที่ตอนเหนือของจีน พบว่าสูงกว่าทางตอนใต้และในสหรัฐอเมริกา รวมทั้งประเทศอุตสาหกรรมอื่นๆ จึงประมาณว่าถ้าความเป็นด่าง (แคลเซียมคาร์บอเนต และ แอมโมเนีย) ถูกกำจัดออกจากบรรยากาศ ค่า pH ของน้ำฝนในพื้นที่ตอนเหนือควรจะประมาณ 3.5 นั่นคือปรากฏการณ์ฝนกรดในประเทศจีนไม่ใช่เกิดจากความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์อย่างเดียว แต่ pH ของน้ำฝนยังขึ้นอยู่กับฝุ่น ด่าง และไอออนบวก (cation) ที่มีอยู่ในบรรยากาศด้วย ในอินเดียทางตอนใต้และตะวันออกเฉียงเหนือค่า pH ของฝนอยู่ในช่วง 6.5-7.0 หรือต่ำกว่า 5.2 เหมือนในจีน ระดับ pH สัมพันธ์กับความเป็นด่าง ถ้าด่างในบรรยากาศถูกกำจัดไป คาดว่าค่า pH ควรจะเป็น 5.6 จากการเก็บตัวอย่างน้ำฝนเป็นระยะเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี 1974-1984 ทางตอน

เหนือของประเทศอินเดีย พบว่า pH ของน้ำฝนมีแนวโน้มลดลง การลดลงนี้เนื่องมาจากการเพิ่มกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรมในระหว่างปี 1970-1980 ทำให้มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น (Bhatti et al., 1990)

ในญี่ปุ่น พบว่าในเมืองใหญ่ pH ของน้ำฝนอยู่ระหว่าง 3.7-4.2 โดยทั่วไปความเข้มข้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์มีมากทางฝั่งทะเลตะวันตกและสูงขึ้นในฤดูหนาว โดยทั่วไป pH ของน้ำฝนในญี่ปุ่นอยู่ในช่วง 4.5-5.5 (Bhatti et al., 1990)

นอกจากนี้ Hara (1993) และ Mohamed and Kamsah (1993) ได้วัดค่า pH น้ำฝนตั้งแต่ปี 1976 ที่เมือง Ryouri ทางตอนเหนือของญี่ปุ่นได้เท่ากับ 4.7 ซึ่งต่ำกว่าในช่วงหลังทศวรรษที่ 1970 ซึ่งมีค่า pH ของน้ำฝนเป็น 5.2

ในมาเลเซีย พบว่า pH ของน้ำฝนอยู่ในช่วง 4.4-4.8 ในพื้นที่รอบๆ กัวลาลัมเปอร์ และพบว่า pH ของน้ำฝนอยู่ในช่วง 4.9-5.5 ใน Perak ของเกาหลี (Bhatti et al., 1990)

สำหรับประเทศไทยได้มีการเก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาความเป็นกรดของน้ำฝน ในปี 1991 Simachaya (1993) ที่กาญจนบุรีและสกลนคร พบว่า ค่า pH ของน้ำฝนอยู่ในช่วง 4.51-6.09 และ 4.70-5.81 เฉลี่ย 5.02 และ 5.00 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างน้ำฝนในกรุงเทพมหานครและเขตเมืองจาก 2 สถานี คือ ONEB (Office of National Environment Board) และ ERTC (Environmental Research and Training Centre) โดยที่ ONEB เป็นตัวแทนของเขตกรุงเทพ ส่วน ERTC เป็นตัวแทนของเขตเมืองใกล้กรุงเทพ พบว่า pH ของน้ำฝนที่เก็บจาก ERTC ในช่วง 2 ปี คือ ระหว่างปี 1992-1993 อยู่ในช่วง 4.15-6.88 เฉลี่ย 5.22 แสดงว่าได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งอาจมาจากโรงงานอุตสาหกรรมและการขนส่งรอบๆ ERTC ส่วน pH ของน้ำฝนจากสถานี ONEB อยู่ในช่วง 4.81-9.20 เฉลี่ย 7.20 เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำฝนจากทั้งสองสถานี พบว่าที่ ONEB ค่า pH สูงกว่าที่ ERTC ซึ่งอาจเนื่องมาจากฝุ่นและดินรอบๆ ตึกของสถานที่ (Simachaya, 1993)

สิทธิชัย (2535) ทำการศึกษาคุณภาพน้ำฝนในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2534 พบว่า ค่า pH ของน้ำฝนจะอยู่ในช่วง 4.71-6.80 และร้อยละ 40 ของตัวอย่างที่ทำการศึกษามีค่า pH ต่ำกว่า 5.6 โดยในเขตเกษตรกรรมมีค่า pH เฉลี่ย 6.00 ส่วนเขตชุมชนที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และชุมชนอุตสาหกรรมมีค่า pH แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 5.65 และ 5.62 ตามลำดับ

4.2 ผลกระทบของฝนกรดที่มีต่อพืช

ฝนกรดส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์หลายด้าน ได้แก่ ผลกระทบต่อป่าไม้และเกษตรกรรม โดยจะส่งผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลทางตรง คือ จะส่งผลต่อใบและส่วนผิวของต้นไม้ เช่น การชะสารอาหารออกจากใบ การทำลายไขที่เคลือบใบและลำต้น ถ้ามีปริมาณมากใบอาจไหม้ และร่วงหมดต้น ทำให้หยุดการเจริญเติบโตทันที (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Wark and Warner, 1981; Bade and Prober-t, 1993) นอกจากนี้การเพิ่มความเป็นกรดของน้ำฝนยังส่งผลต่อการออกดอก การติดเมล็ด การงอกของเมล็ด และการเจริญเติบโตเป็นต้นกล้าซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของพืช (Wellburn, 1990)

Payne และ Blackford (2005) พบว่าฝนกรดจำลองจะทำให้ *Calluna vulgaris* ที่ปลูกบนมอสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงมีอาการช้ำและใบที่ยอดมีสีแดง จากนั้น 3 วันมอส *Hypnum cupressiforme* จะมีสีซีดลง และเมื่อผ่านไป 1 เดือนพืชจะตายหรือแห้งไป แต่จะไม่พบอาการเหล่านี้ในไลเคน *Cladonia portentosa* การเจริญเติบโตของต้นกล้า *Eriophorum vaginatum* และ *C. vulgaris* จะถูกจำกัด เช่นเดียวกับการออกดอกของ *C. vulgaris* เมื่อได้รับฝนกรดความเข้มข้นสูงจะทำให้การออกดอกลดลงหรือไม่ออกดอกเลย ซึ่งจะส่งผลให้การติดเมล็ดของพืชลดลงด้วย

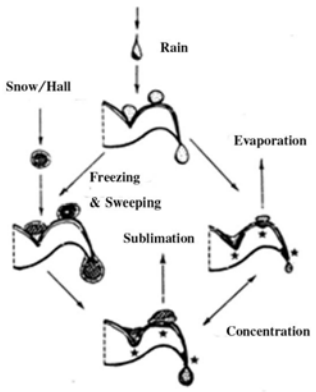
Liebfried (n.d.) แห่งมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนียยังกล่าวอีกว่าฝนกรดทำให้เมล็ดของพืชบางชนิดงอกก่อนกำหนดและทำให้ต้นกล้าที่เพิ่งงอกใหม่ได้รับอันตราย เช่น เมล็ดของต้น yellow birch และ red maple แต่จะไม่มีผลต่อการงอกของเมล็ด sugar maple และ eastern hemlock ส่วน white pine และ white spruce จะงอกได้ดีเมื่อได้รับฝนกรด

Iqbal และ Qadir (1994) รายงานว่าผลกระทบของหมอกกรดส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า *Eucalyptus* sp. และ *Pongamia pinnata* คือ พืชทั้งสองชนิดจะมีความสูงต้น จำนวนใบ และเส้นรอบวงลดลง โดยในตำรับทดลอง pH 3.0 และ 4.0 พืชทั้งสองชนิดมีมวลชีวภาพน้อย แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในตำรับทดลอง pH 5.0 และ 6.0 ของ *P. pinnata* แต่มวลชีวภาพแห้งจะสูงสุดในตำรับทดลอง pH 7.0 พื้นที่ใบของพืชทั้งสองชนิดลดลงในทุกระดับ pH ของฝน ยกเว้นใน *P. pinnata* ที่ระดับ pH 5.0 ของฝนจะมีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้น มากกว่า pH 7.0 ถึง 12.2 เปอร์เซ็นต์

4.2.1 ผลกระทบต่อใบพืช

มีรายงานว่าความเสียหายของใบเป็นผลโดยตรงจากฝนกรด ซึ่งเป็นอันตรายกับใบพืชที่มีความไวต่อ pH $\leq$ 3.4 เช่น ผักกาดขาว ผักกาด ถั่วเหลือง และ ถั่ว ระดับความเสียหายจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและช่วงระยะเวลาในการเกิดฝนกรด ดังนั้นช่วงเวลาที่เม็ดฝนสัมผัสกับผิวใบจะเป็นตัวกำหนดความเสียหาย ดังเช่นที่มีผู้ทำการทดลองเกี่ยวกับฝนกรดกับต้นสนเข็ม พบว่าใบสนที่ได้รับฝนกรดเทียมมีความเสียหายเหมือนกับใบสนที่ได้รับฝนกรดธรรมชาติ โดยพบการสึกของคิวติเคิล (cuticle) ของใบ และการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบที่เล็กมากของผิวใบ และจะให้ผลแตกต่างจากใบสนที่ไม่โดนฝนกรด และยังพบว่าหากชักนำให้เกิดฝนกรดเป็นเวลานานจะทำให้คิวติเคิลของสนเข็มเสื่อมลง หรือทำให้เกิดรอยแตกของชั้นแว๊กซ์ (wax) บางๆ ที่ปกคลุมปากใบของสน อาจส่งผลโดยตรงต่อการแทรกซึมของกรดและมลพิษอื่นๆ ยกระดับความรุนแรงของแมลงและเชื้อรา เพิ่มความไวในการสูญเสียน้ำ ความเสียหายจากน้ำค้างแข็ง หรือความเครียดอื่นๆ ปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น กระแสลม นอกจากนี้ความสามารถในการเปียกของพื้นที่ผิวและสัณฐานของใบก็มีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการสัมผัส เช่น 95% ของใบที่เสียหายจากฝนกรดจะพบที่บริเวณเส้นใบหรือขอบใบ ใกล้ขนใบและติดอยู่ที่ปากใบ (Wellburn, 1990)

ภายในพื้นที่ที่เปียกฝนอาจมีกระบวนการเกิดกรดซัลฟิวริกขึ้น ออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ละลายน้ำอาจจะละลายต่อไปและจะถูกเร่งโดยการระเหยให้สารละลายที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดการผุพังหรือการเสื่อมของคิวติเคิล (cuticle) ที่หุ้มใบ กรดจัดสามารถออกซิไดซ์และไฮโดรไลซ์แว๊กซ์เอสเทอร์ (wax ester) ได้ และสามารถปลดปล่อยกรดไขมันที่เป็นโซ่ยาวจากแว๊กซ์เมทริก (waxy matrix) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไม่ชอบน้ำของคิวติเคิลของใบและการเพิ่มความสามารถในการเปียกมากขึ้น (Wellburn, 1990)



ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการที่ทำให้เกิดการเพิ่มความเข้มข้นของกรดบนใบพืช บริเวณที่มีเครื่องหมายดอกจันจะถูกทำลายมากที่สุด (Alan, 1988)

จากการศึกษายังพบหลักฐานว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นพิษต่อพืชมากกว่ามนุษย์และสัตว์ เพราะความเข้มข้นเพียง 0.03 mg kg^{-1} ก็สามารถทำความเสียหายแก่ใบไม้โดยตรง คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำลายคลอโรฟิลล์ของพืช ทำให้ใบไม้สีซีดลงและเมื่อคลอโรฟิลล์ถูกทำลายพืชจะตายในที่สุดเพราะไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ (สำนักบริการสารสนเทศอุตสาหกรรมพลังงาน, 2546) นอกจากนี้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลทำให้การหายใจของพืชลดลงหรือเสื่อมลง เนื่องจากสารมลพิษจะไปทำลายคลอโรฟิลล์และทำลายปากใบของพืช (นิรันดร์, 2539)

ธิดาพร (2544) ศึกษาผลกระทบของฝนกรดต่อการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนีย พบว่าฝนกรดทำให้เกิดภาวะคลอโรซิส (chlorosis) และนีโคลซิส (necrosis) ในใบพืชที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ pH 3.0 และเกิดภาวะคลอโรซิสในใบพืชที่ได้รับน้ำฝนสังเคราะห์ pH 4.0 ค่าน้ำหนักสดต่อน้ำหนักแห้งในใบพืชที่ได้รับน้ำฝนสังเคราะห์ pH 3.0 และ 4.0 มีค่าต่ำกว่าในใบพืชปกติ ปริมาณคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ในใบพืชที่ได้รับฝนสังเคราะห์ pH 3.0 มีค่าต่ำกว่าในใบพืชปกติ ส่วนน้ำฝน pH 4.0 ไม่ทำให้ค่าคลอโรฟิลล์ในพืชแตกต่างจากพืชปกติ ปากใบและส่วนของผิวใบที่ผ่านฝนกรดซัลฟูริกจะถูกทำลาย พบว่าถูกทำลายมากเมื่อได้รับฝนกรด pH 3.0

4.2.2 ผลกระทบระดับเซลล์พืช

Lancaster University ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ที่ระดับ pH ต่างๆ กับการแสดงออกของพืช พบว่าข้าวบาร์เลย์และต้นสนมีเซลล์ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแแปลง pH ได้ ซึ่งเรียกสมบัติของเซลล์นี้ว่า buffer capacity จากการศึกษาจากแหล่งอื่นพบว่าสมบัติดังกล่าวเป็นลักษณะที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรม พืชใดที่ได้รับการถ่ายทอดสมบัตินี้ไปจะสามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง pH ได้ดีกว่าพืชที่ไม่ได้รับการถ่ายทอดสมบัติดังกล่าว จึงเป็นไปได้ว่าพืชที่ไม่ได้รับการถ่ายทอดยีนส์ตัวนี้จะไม่สามารถทนต่อความเป็นกรดได้ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตที่ต่ำ (Wellburn, 1990)

ไอออนของซัลเฟตก็มีผลต่อกระบวนการ carbon fixation และเกี่ยวข้องกับการทำหน้าที่ของเซลล์เมมเบรน ส่งผลต่อการยุบตัวของเซลล์และการเกิด plasmolysis ซึ่งจะเกิดในชิ้นส่วนของพืชที่มีอายุน้อย ทำให้เนื้อเยื่อนั้นตาย ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ เช่น HSO_3^- ซึ่งเป็นอันตรายต่อพืชพวกตะไคร่น้ำชนิดหนึ่ง (Environmental Resources Ltd., 1983)

4.2.3 ผลกระทบต่อดิน

ฝนกรดจะส่งผลต่อความเป็นกรดในดิน อาจทำให้เกิดการชะไนเตรทและธาตุอาหารที่สำคัญ เช่น เหล็ก อลูมินั่ม แมงกานีส โบรอน ทองแดง สังกะสี จากดินลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของพืชลดลง ความต้านทานโรค แมลง และอากาศเย็นจัดลดลงได้ นอกจากนี้ฝนกรดยังทำให้กระบวนการย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในดินลดลง (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534; Wark and Warner, 1981; Bade and Prober-t, 1993)

มีรายงานว่า ในกลุ่มประเทศสมาชิก EU (European union) ซึ่งดินส่วนใหญ่เป็น calcareous soil พื้นที่ใช้ทำการเกษตรและพื้นที่ป่าไม้ เช่น ป่าสน ป่า spruce เป็นดินที่มีความเป็นกรดซึ่งเกิดจากฝนกรด แต่ในพื้นที่ที่ทำการเกษตรแบบเข้มข้นการเกิดกรดในดินจะเกิดได้จากกระบวนการไนตริฟิเคชั่นได้อีกด้วย ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าการเกิดจากฝนกรด (Environmental Resources Ltd., 1983)

ในดิน siliceous soil ซึ่งมีวัตถุต้นกำเนิดมาจากหินแกรนิตมักสูญเสียธาตุไอออนที่เป็นด่าง เช่น แคลเซียม และแมกนีเซียมไป ทำให้ความสามารถในการทำให้เป็นกลางของดินหลังจากได้รับอิทธิพลของฝนกรดลดลง ซึ่งพบได้ในประเทศสก๊อตแลนด์ นอร์เวย์ใต้ และตะวันตกของสวีเดน (Environmental Resources Ltd., 1983)

นอกจากนี้ยังมีงานทดลองที่ให้ฝนกรดกับไม้ยืนต้น เช่น เมเปิ้ล สน และ สนเข็ม พบว่ามีการชะล้างไอออนบวก เช่น K^{+}, Mg^{++}, Ca^{++} ออกจากใบ และไปสะสมอยู่ที่ฐานของต้นพืชร่วมกับธาตุอาหารอื่นๆ (Wellburn, 1990)

4.2.4 ผลกระทบต่อจุลินทรีย์ดิน

Grant et al. (1979) ศึกษาผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อ heterotrophic microorganism พบว่าจำนวนแบคทีเรียกลุ่มนี้ลดลงในดินที่ได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปริมาณ 1.0 $\mu l\ l^{-1}$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการออกซิเดชั่นกลูโคสจะลดลง ซึ่งการลดลงนี้แปรผันโดยตรงกับระยะเวลาสัมผัส

Francis (1982) ศึกษาผลของฝนกรดและความเป็นกรดในดินต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน พบว่า pH ของดินมีผลต่อขบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น (ammonification) คือ เมื่อความเป็นกรดของดินเพิ่มขึ้นจะเกิดแอมโมเนียมลดลง ส่วนขบวนการไนตริฟิเคชั่น (nitrification)

จะเกิดได้ดีในสภาพที่ดินเป็นกรด นอกจากนี้ความเป็นกรดของดินยังทำให้ไม่พบกิจกรรมของกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixing bacteria) ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และขบวนการ nitrogen mineralization ลดลง

Bewley และ Parkinson (1984) ทำการศึกษาเปรียบเทียบจำนวนจุลินทรีย์ในดิน 3 แห่ง ที่อยู่ห่างจากแหล่งปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นระยะทาง 2.8 6.0 และ 9.6 กิโลเมตร ตามลำดับ พบว่าจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด (total count) และ starch utilizing bacteria จากดินอินทรีย์ของจุดที่ 1 (ห่างจากแหล่งปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2.8 กิโลเมตร) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และแบคทีเรียในจุดที่ 1 นี้ส่วนใหญ่เป็นพวกที่สร้างสปอร์

Kytoviita et al. (1990) ศึกษาผลของฝนกรดสังเคราะห์ต่อจำนวนจุลินทรีย์ในดิน โดยศึกษาในพื้นที่ทดลองทางตอนเหนือของฟินแลนด์ โดยพื้นที่เปรียบเทียบ (control) ได้รับน้ำ pH 6 ส่วนพื้นที่ได้รับฝนกรดจะได้รับกรดซัลฟูริกผสมกับกรดไนตริก ปรับ pH ให้เป็น 3.0 หลังจากพื้นที่ทดลองได้รับน้ำฝนต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ฤดูกาลเพาะปลูก พบว่าในดินที่ได้รับฝนกรดพบจำนวนแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ประโยชน์จากแป้ง โปรตีน เพคติน ไซลิน และเซลลูโลสน้อยกว่าในดินที่ไม่ได้รับฝนกรดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

Lettl (1981) ศึกษาผลระยะยาวของสารประกอบซัลเฟอร์ต่อจุลินทรีย์ในดิน พบว่าสารประกอบซัลเฟอร์ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลง แต่เพิ่มจำนวนราและ sulfate reducing bacteria นอกจากนี้สารประกอบซัลเฟตยังส่งผลให้การหายใจ กระบวนการไนตริฟิเคชั่นและการออกซิเดชั่นไทโอซัลเฟต (thiosulfate) ถูกยับยั้ง แต่กระตุ้นกระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่นและการออกซิเดชั่นซัลเฟอร์

Lettl (1990) ศึกษาผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อจุลินทรีย์ในดินป่า พบว่า heterotrophic bacteria ลดลงในขณะที่ microfungi เพิ่มขึ้น ส่วนการย่อยสลายเซลลูโลส (cellulose) การหายใจ ขบวนการแอมโมนิฟิเคชั่นและอิมโมบิไลเซชั่น (immobilization) ของ ammonium nitrogen รวมทั้งออกซิเดชั่นของ thiosulphate ลดลง แต่ขบวนการออกซิเดชั่นของ elemental sulphur เพิ่มขึ้น และพบจุลินทรีย์กลุ่ม sulphite resistance ส่วนกลุ่ม Pseudomonas, amylolytic, ammonifiying bacteria และ heterotrophic reducers of elemental sulphur ลดลง แต่กลุ่ม autotropic และ heterotrophic sulfurdioxide oxidizers เพิ่มขึ้น ซึ่งผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม acidophilic เจริญได้ดีกว่ากลุ่ม neutrophilic

Greszta et al. (1992) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในดินที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ โดยทำให้น้ำ pH 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.8 เป็นเวลา 2 ฤดูกาลเพาะปลูก พบว่า ในดินที่ได้รับฝนกรด ขบวนการไนตริฟิเคชั่น การย่อยสลายเซลลูโลส และการหายใจในดินถูกยับยั้ง ในขณะที่ขบวนการแอมโมนิฟิเคชั่นถูกกระตุ้น ฝนกรดที่ให้ไม่ได้ทำให้องค์ประกอบของคาร์บอนและไนโตรเจนในดินเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ทั้ง fulvic, gray และ brown humic acid ลดลง

Miller et al. (1991) ทำการศึกษาจำนวนจุลินทรีย์ในดินความลึก 3 เซนติเมตรจากผิวดิน ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดและถั่วเหลืองที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ พบว่า nitrite oxidizing bacteria มีจำนวนลดลง ในตัวอย่างที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ pH 4.2 และ 3.0 ในพื้นที่ปลูกข้าวโพด และตัวอย่างที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ pH 3.0 ในพื้นที่ปลูกถั่วเหลือง ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวโพดที่ได้รับฝนกรดสังเคราะห์ pH 3.0 จำนวน thiosulphate oxidizing bacteria สูงขึ้น แต่ general heterotrophic bacteria ต่ำลง และฝนกรดที่ให้ไม่ส่งผลให้ pH ของดินลดลง

สุธารัตน์ (2538) ศึกษาผลกระทบของฝนกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในดิน โดยทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 102 วัน พบว่า ดินที่ได้รับน้ำฝนสังเคราะห์ปริมาณ 20 มิลลิลิตรต่อวัน ที่ระดับความเป็นกรดของฝน pH 5.0, 4.0 และ 3.0 ไม่ส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั่วไป ส่วนดินที่ได้รับน้ำฝนสังเคราะห์ปริมาณ 70 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่าน้ำฝนสังเคราะห์ pH 4.0 และ 3.0 ส่งผลต่อปริมาณแบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และแอมโมนิฟายอิ้งแบคทีเรีย ที่ระดับความลึก 6 เซนติเมตร จากผิวดิน มีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปรียบเทียบ (control) อย่างไรก็ตามปริมาณฝนกรดสังเคราะห์ที่ระดับ pH ทั้ง 3 ไม่ทำให้ค่า pH ของดินเปลี่ยนแปลง

4.2.5 ผลกระทบของฝนกรดทางอ้อมอื่น ๆ

การเกิดภาวะมลพิษและฝนกรดเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความกดอากาศ การเปลี่ยนแปลงของดินที่เป็นไปอย่างช้า ๆ และการระบาดของแมลงศัตรูพืชและเชื้อโรค การสะสมของกรดในดินทำให้ปล่อยสารอลูมิเนียมออกมา อลูมิเนียมอาจทำให้สารเคมีชนิดอื่น ๆ ลดลง เช่น แมกนีเซียม และแคลเซียม (งามจิตต์ และคณะ, 2544)

มีรายงานว่าทั้งฝนกรด หมอกกรด และน้ำค้างกรดได้ทำลายป่าไม้และพืชผลทางการเกษตรจำนวนมาก มีการค้นพบว่าต้นไม้ในหุบเขาเวอร์มอนต์ลดลงถึง 50% เนื่องจากฝนกรด หมอกกรด และน้ำค้างกรดไปทำให้ต้นไม้หลายชนิดตายไป บางชนิดแคระแกรน นอกจากนี้

ในมลรัฐนิวอิงแลนด์และแคลิฟอร์เนียของสหรัฐอเมริกาประสบกับปัญหาฝนกรดทำลายป่าไม้ ฝนกรดยังก่อให้เกิดภาวะขาดแคลนธาตุไนโตรเจนในพืช เนื่องจากค่า pH ที่ลดต่ำลงทำให้ไฮโดรเจนไอออนเข้าไปแทนที่ไนโตรเจนไอออนในกระบวนการเมตาบอลิซึม และการสังเคราะห์โปรตีนถูกทำลาย นอกจากนี้ยังพบความเป็นพิษของอลูมินัมในพืชด้วย (ฐนันดร์ศักดิ์, 2534)

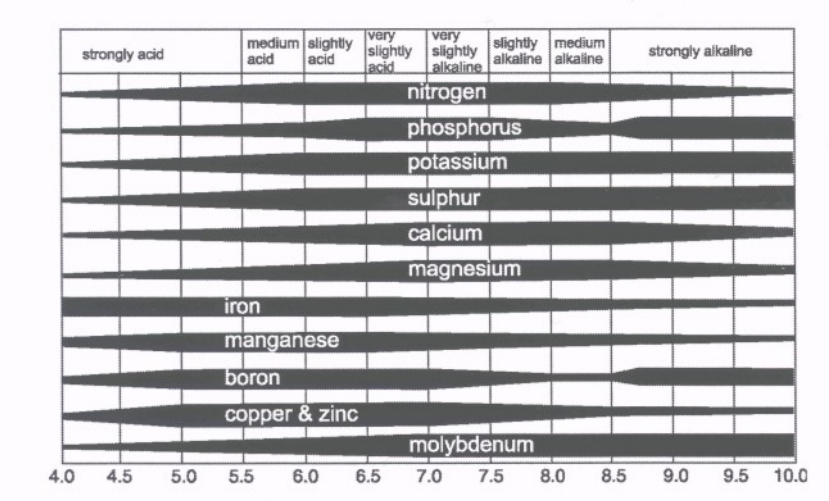
กรณีป่าดำในประเทศเยอรมัน ฝนกรดจะเข้าไปทำลายห่วงโซ่อาหารที่สำคัญ คือ พืช ป่าไม้ที่มีความต้านทานกรดต่ำ ทำลายสัตว์ขนาดเล็กในระบบนิเวศน์ มีรายงานว่าทะเลสาบในภาคตะวันออกของประเทศแคนนาดาประมาณ 150,000 แห่งมีสภาพเป็นกรดสูง จนทำให้ปลาที่อาศัยอยู่เปลี่ยนรูปร่างไป และทะเลสาบอีกราว 14,000 แห่ง มีสภาพเป็นกรดสูงจนปลาไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ ทะเลสาบในภาคตะวันออกของสหรัฐอเมริกากว่า 1,000 แห่งมีสภาพเป็นกรดสูง สิ่งมีชีวิตเล็กๆ อาศัยอยู่ไม่ได้ (ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาธรรมศาสตร์, 2546)

ในประเทศสหรัฐอเมริกา ฝนกรดมีผลรุนแรงต่อระบบนิเวศน์เฉพาะทางเทือกเขา Adi Rondack และในรัฐแถบ New England เพราะเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีความต้านทานกรดโดยธรรมชาติ คือขาด buffering capacity เช่น ถ้าพื้นที่มีหินปูนมาก ฝนกรดจะถูกทำให้เป็นกลางโดยความเป็นด่างของหินปูน ดังนั้นแม้จะมีฝนกรดตกลงมาไม่มากนัก ค่า pH ของแหล่งน้ำจะลดลง อย่างรวดเร็ว และน้ำฝนหรือหิมะที่เป็นกรดจะอยู่ในระบบนิเวศน์ได้นานพอที่จะเกิดผลอื่นทางอ้อม เช่น ละลายอลูมิเนียมในดินลงไปในน้ำ (ที่ pH ต่ำกว่า 4.6) ก่อให้เกิดปัญหากับปลาในน้ำ (แสงสันต์, 2530)

วิเชียร (2544) ศึกษาปริมาณเกลือไอออนิก จากทะเลต่อการตกสะสมของกรดในพื้นที่ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดด่างของตัวอย่างน้ำฝนตั้งแต่เดือนธันวาคม 2543 ถึง พฤศจิกายน 2544 มีค่าอยู่ในช่วง 4.4- 6.8 ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.0-57.4 mS cm^{-1} สำหรับความเข้มข้นของอิออนชนิดต่างๆ พบว่าอิออนเกลือทะเลหรือคลอไรด์อิออนและโซเดียมอิออนมีค่ามากที่สุด เฉลี่ย 61.0 และ 52.6 ไมโครกรัมสมมูลต่อลิตร ตามลำดับ และพบโพแทสเซียมอิออนน้อยที่สุดได้เท่ากับ 12.2 ไมโครกรัมสมมูลต่อลิตร ศึกษาการตกสะสมของสารกรด (ซัลเฟตและไนเตรต) เท่ากับ 0.027 และ 0.024 กรัมสมมูลต่อตารางเมตรต่อปี ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างการตกสะสมแบบแห้งพบว่า อนุภาคโซเดียมมีปริมาณสูงกว่าอิออนอื่นๆ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45.3 nmol m^{-3} และรองลงมา ได้แก่ แอมโมเนียม ซัลเฟต และคลอไรด์ มีค่าเท่ากับ 30.9, 25.8 และ 25.3 nmol m^{-3} ตามลำดับ สำหรับการตกสะสมแบบแห้งมีแอมโมเนียมสูงสุดเท่ากับ 166.7 mmol m^{-3}

yr^{-1} รองลงมาได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดไนตริกมีค่า 15.8, 6.7 และ 2.4 mmol m^{-3} yr^{-1} ตามลำดับ

อาจกล่าวได้ว่าการเกิดฝนกรดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ภายในชั้นหน้าตัดดิน ซึ่งจะเกี่ยวโยงไปถึงระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดิน เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 สาเหตุด้วยกันคือ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ในสารละลายดินที่สูงเกินไปอาจมีอิทธิพลต่อการดูดธาตุอาหารของพืชโดยตรง หรืออาจมีผลต่อความสามารถในการละลายได้ของธาตุอาหาร ตลอดจนธาตุที่อาจเป็นพิษต่อพืชและต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีผลถึงการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหาร ซึ่งเป็นผลทางอ้อมของปฏิกิริยาดิน เช่น สารประกอบของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี จะละลายได้น้อยลงเมื่อ pH ของดินเพิ่มจาก 5.0 เป็น 7.5 หรือ 8.0 ขณะเดียวกันโมลิบดินัมจะละลายออกมาให้พืชใช้ได้ดีขึ้นในดินที่มี pH สูงๆ ซึ่งในสภาพดังกล่าวมักมีไบคาร์บอเนตสะสมอยู่มาก และถ้าไบคาร์บอเนตมีมากเกินไปอาจยับยั้งการดูดธาตุอาหารและน้ำของพืชได้ หากดินเป็นกรดหรือ pH ต่ำกว่า 5.0 อลูมินัม เหล็ก และแมงกานีสมักจะละลายออกมามากจนอาจเป็นพิษต่อพืช ส่วนฟอสฟอรัส ที่ระดับ pH 6.0–7.0 ฟอสฟอรัสจะละลายออกมาได้มากที่สุด หากต่ำกว่า 5.0 ลงมาหรือสูงกว่า 7.0 ขึ้นไป ฟอสฟอรัสจะเหลืออยู่ในสารละลายดินน้อยมาก เพราะถูกตรึงด้วยเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีสเมื่อดินเป็นกรด และถูกตรึงด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมเมื่อดินเป็นด่าง (ยงยุทธ และคณะ, 2541) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงอิทธิพลระหว่างระดับ pH ของดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างชุดดินอยุธยา ชุดดินบางกอก ชุดดินกำแพงแสน และชุดดินสัตหีบ ที่ความลึก 0–50 เซนติเมตร

2. เมล็ดกระเจี๊ยบเขียวพันธุ์มอญลูกผสม (F1 Hybrid; 473 Lucky Five ตราต้นกล้า)

3. วัสดุปลูก ประกอบด้วย ดิน ขุยมะพร้าว ขี้เถ้าแกลบ แกลบเก่า ปุ๋ยคอก ไตรโคเดอร์มา EM (วัสดุปลูกดินผสม ตราดินปริญญา)

4. กระถางพลาสติกพร้อมขวดรอง 72 ใบ

5. ปุ๋ยสูตร 15-15-15

6. กรดซัลฟูริก

7. กรดไนตริก

8. เครื่อง pH meter วัดน้ำ รุ่น EcoScan pH 6 ของบริษัท Eutech

9. เครื่อง pH meter วัดดิน รุ่น model 420 A ของบริษัท Orian

10. เครื่อง EC meter รุ่น 4010 Conductivity Meter ของบริษัท Jenway

11. Block digestor

12. เครื่องกลั่นไนโตรเจน รุ่น Vapodest VAP 20 ของบริษัท Gerhardt รวมทั้งอุปกรณ์เครื่องแก้ว และสารเคมีเพื่อวัดค่าไนโตรเจน

13. เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Spectronic 21 ของบริษัท Milton Roy รวมทั้งอุปกรณ์ เครื่องแก้ว และสารเคมีเพื่อวัดค่าฟอสฟอรัส

14. เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer รุ่น Spectr AA 220 FS ของบริษัท Varian รวมทั้งอุปกรณ์ เครื่องแก้ว และสารเคมีเพื่อวัดค่าโพแทสเซียม

15. เครื่องบดดิน

16. เครื่องบดตัวอย่างพืช

17. อุปกรณ์วัดศักย์น้ำในใบพืช

17.1 Pressure chamber รุ่น 650 ของบริษัท PMS Instrument

17.2 Vapor pressure osmometer รุ่น 5520 VAPRO® ของบริษัท Wescor

17.3 ก๊าซไนโตรเจน

17.4 ไนโตรเจนเหลว

17.5 เครื่องคั้นสารละลายในใบพืช

18. อุปกรณ์วัดสภาพอากาศ ประกอบด้วยเครื่องเก็บข้อมูลสภาพอากาศแบบอัตโนมัติ Watch dog datalogger รุ่น 450 ของบริษัท Spectrum Technologies ใช้วัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

19. เครื่องชั่งค่าคลาดเคลื่อน $\pm$ 0.001 กรัม รุ่น CP 323 S ของบริษัท Sartorius

20. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน (Auger)

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดลอง

ตัวอย่างดินทั้ง 4 ชุดดิน (ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินเป็นดังตารางที่ 1) ถูกเก็บที่ระดับความลึก 0–50 เซนติเมตร จากผิวดิน แบบรบกวนโครงสร้าง (disturbed soil sample) แล้วนำมาผึ่งดินให้แห้ง บดตัวอย่างดินให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเบื้องต้นโดยวิธีมาตรฐาน ได้แก่ ปฏิกิริยาดิน (soil pH) วัดด้วยเครื่อง pH meter โดยใช้สัดส่วนดินกับน้ำ 1:1 ตามวิธีที่เสนอโดย McLean (1982), สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (electrical conductivity saturation; ECe) วัดด้วยเครื่อง EC meter ตามวิธีที่นำเสนอโดย Rhoades (1982), ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (soil organic matter) วัดโดยวิธี Walkly and Black (Nelson and Sommers, 1982), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ตามวิธี Kjeldahl (Bremner and Muluancy, 1982), ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus) โดยวิธี digestion (Olsen and Sommers, 1982), ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (total potassium) วัดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Knudsen et al., 1982), ปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรท (available nitrogen) วัดโดยวิธี Kjeldahl (Bremner and Muluancy, 1982), ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) ตามวิธี Bray II (Olsen and Sommers, 1982), ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Knudson et al., 1982)

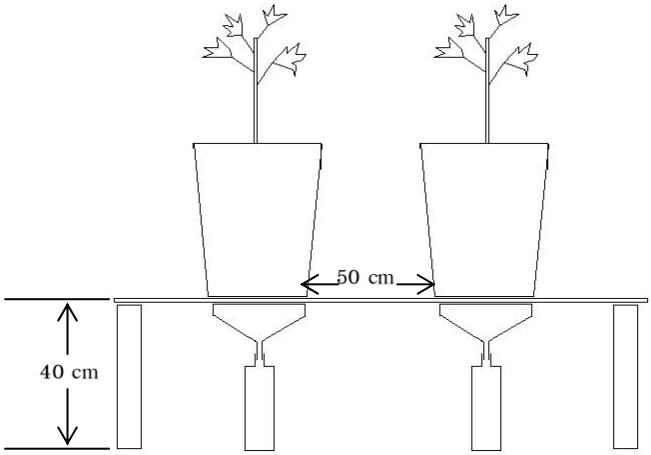
ตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ชุดดิน	ละติจูด	ลองติจูด
อยุธยา (Ay)	14° 1.54′	100° 3.85′
บางกอก (Bk)	13° 33.68′	101° 4.98′
กำแพงแสน (Ks)	13° 24.42′	99° 16.20′
สัตหีบ (Sh)	13° 3.83′	101° 25.56′

2. การเตรียมพืชทดสอบ

เพาะเมล็ดกระเจี๊ยบเขียวพันธุ์มอญลูกผสม F1 ในถาดเพาะซึ่งใช้วัสดุปลูกดินผสมประกอบด้วย ดิน ขุยมะพร้าว ถ่านแกลบ แกลบเก่า ปุ๋ยคอก ในสัดส่วน 1:3:2:2:2 ผสมเชื้อไตร

โคเดอร์มาและ essential microorganism (EM) ในสัดส่วนอย่างละ 1:500 หลังจากกระเจี๊ยบเขียวมีใบจริง 2 ใบ ย้ายต้นกล้าลงปลูกในถุงพลาสติก (ใส่วัสดุปลูกเดิม) เมื่อต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียวมีอายุได้ 30 วัน ย้ายปลูกอีกครั้งลงในกระถางพลาสติกที่บรรจุชุดดินต่างๆ วางกระถางบนชั้นวางลอยสูงจากผิวดินประมาณ 40 เซนติเมตร ระยะการวางกระถางเป็น 50x50 เซนติเมตร x เซนติเมตร ให้น้ำในอัตรา 1 ลิตรต่อต้นต่อวัน โดยการติดหัวมินิสปริงเกอร์จำนวน 7 หัวต่อตำรับทดลอง หัวฉีดอยู่สูงจากพื้นประมาณ 3 เมตร ฉีดฝอยเหนือทรงพุ่ม (over-canopysprinkler) เพื่อจำลองลักษณะการเกิดฝนตกเป็นเวลา 43 วัน ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 เป็นปุ๋ยรองพื้นในกระถาง ใส่ปุ๋ยครั้งแรกเมื่ออายุได้ 15 วัน อัตรา 3 กรัม/ต้น ใส่ทุกๆ 20 วัน หลังจากย้ายต้นลงกระถางไปแล้ว 7 วัน จึงจะเริ่มให้น้ำฝนที่มีอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจน และถือเป็นเริ่มการทดลอง รวมตลอดการทดลองกระเจี๊ยบเขียวมีอายุได้ 93 วัน ตลอดระยะเวลาปลูกจะทำการฉีดพ่นสารเคมีป้องกันกำจัดโรคและแมลงตามความเหมาะสม



ภาพที่ 3 การวางกระถางปลูกและชั้นวางลอย

3. การจำลองฝนที่มีอนุมูลซัลเฟตและออกไซด์ของไนโตรเจน

สร้างฝนที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต (SO_x) ทำโดยนำกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้นมาเจือจางในน้ำ แล้วปรับค่าด้วยเครื่อง pH meter ให้ได้ค่า pH ของน้ำเป็น 3 ระดับ คือ 5.0 4.0 และ 3.0

สร้างฝนที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ทำโดยนำกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้นเจือจางในน้ำ แล้วปรับค่าด้วยเครื่อง pH meter ให้ได้ค่า pH ของน้ำเป็น 3 ระดับ คือ 5.0 4.0 และ 3.0

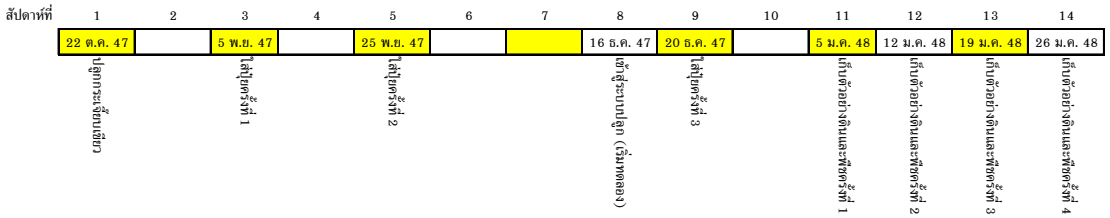
ทำการเตรียมฝนจำลองใหม่ทุกวัน โดยเตรียมตำรับทดลองละ 200 ลิตร

4. <u>การศึกษาอิทธิพลของฝนที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต</u>

วางแผนการทดลองแบบ RCB Design with 4x4 Factorial Treatment โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ชุดดิน 4 ชุดดิน และระดับ pH ของน้ำที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต 4 ระดับ คือ น้ำเปล่า pH เท่ากับ 6.7 (control) pH 5.0 4.0 และ 3.0 ทดลองตำรับละ 3 ซ้ำ ใช้หน่วยทดลองทั้งหมด 48 หน่วยทดลอง (4 ชุดดิน x 4 ระดับ pH x 3 ซ้ำ)

ระหว่างทดลอง เก็บตัวอย่างดินจำนวน 4 ครั้ง โดยใช้ auger ขนาดเล็กเก็บดินที่อยู่ห่างจากต้นประมาณ 5 เซนติเมตร ดินเก็บที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร จากผิวดิน ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 1 (ประมาณ 22 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 2 (ประมาณ 29 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 3 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 3 (ประมาณ 36 วันหลังเริ่มทดลอง) และ ครั้งที่ 4 เก็บตัวอย่างหลังจากสิ้นสุดการทดลอง (ประมาณ 43 วันหลังเริ่มทดลอง) นำตัวอย่างดินที่เก็บได้มาผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 และ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ทางเคมีตามวิธีมาตรฐาน ค่าที่วิเคราะห์เป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน

ระหว่างทดลอง เก็บตัวอย่างพืชจำนวน 4 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 1 (22 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 2 (29 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 3 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 3 (36 วันหลังเริ่มทดลอง) และ ครั้งที่ 4 เก็บตัวอย่างพืชที่เหลืออยู่ทั้งหมด (43 วันหลังเริ่มทดลอง) นำตัวอย่างพืชที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง นำมาวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด วัดโดยวิธี Kjeldahl (Horneck and Miller, 1998), ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด วัดโดยวิธี colorimetric (vanado-molybdate yellow color) ซึ่งเสนอโดยทัศนีย์และจงรักษ์ (2542), ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด วัดโดยเครื่อง atomic emission spectrophotometer (Hanlon, 1998)



<u>ภาพที่ 4</u> ช่วงเวลาการปฏิบัติงานของการศึกษาอิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต

ระหว่างทดลองได้เก็บข้อมูลสภาพอากาศภายในโรงเรือน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลสภาพอากาศแบบอัตโนมัติ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความดันไอน้ำที่บรรยากาศสามารถรับได้ หาค่าพลังงานศักย์น้ำในใบกระเจี๊ยบเขียวในรอบวัน ซึ่งจะอธิบายในลำดับถัดไป

นำค่าวิเคราะห์ดินและพืช คำนวณหาสัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุอาหารหลักที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณธาตุอาหารหลักทั้งหมดในดิน ณ เวลาหนึ่งๆ (K_d) หาสัดส่วนการนำธาตุอาหารหลักไปใช้ของพืช วิเคราะห์สถิติแบบ RCB 4x4 factorial arrangement และ RCB 4x4x4 factorial arrangement โดยมีปัจจัยศึกษาคือ ชุดดิน ระดับ pH ของน้ำที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต และเวลาในการเก็บตัวอย่าง เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีตเมนต์โดยวิธีของดันแคน (Duncan's new multiple range test, DMRT) (พิศมัย, 2543)

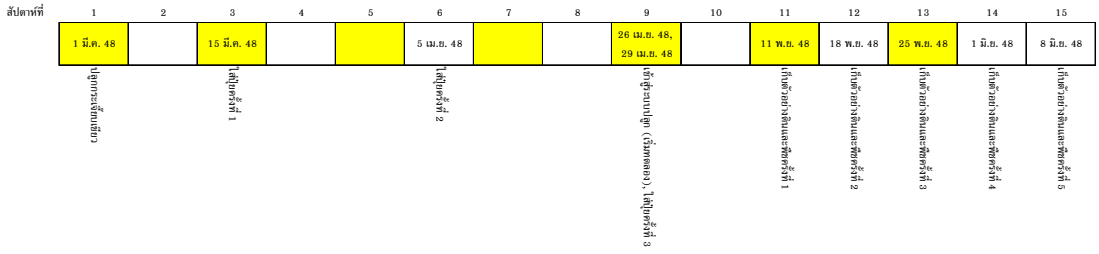
5. <u>การศึกษาอิทธิพลของฝนที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน</u>

วางแผนการทดลองแบบ RCB Design with 4x4 Factorial Treatment โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ชุดดิน 4 ชุดดิน และระดับ pH ของน้ำที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน 4 ระดับ คือ น้ำเปล่า, 3.0, 4.0 และ 5.0 ทดลองตำรับละ 3 ซ้ำ ใช้หน่วยทดลองทั้งหมด 48 หน่วยทดลอง (4 ชุดดิน x 4 ระดับ pH x 3 ซ้ำ)

ระหว่างทดลองเก็บตัวอย่างดินจำนวน 5 ครั้ง ดินเก็บที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร และ 10-20 เซนติเมตร จากผิวดิน คือ ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างก่อนเก็บฝักรุ่นที่ 1 เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (ประมาณ 15 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 1 (ประมาณ 22 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 3 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 2 (ประมาณ 29 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 4 เก็บตัวอย่างหลังเก็บฝักรุ่นที่ 3 (ประมาณ 36 วันหลังเริ่มทดลอง) และ ครั้งที่ 5 เก็บตัวอย่างหลังจากสิ้นสุดการทดลอง (ประมาณ 43 วันหลังเริ่มทดลอง) นำตัวอย่างดินที่เก็บ

ได้มาผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 และ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ทางเคมีตามวิธีมาตรฐาน ค่าที่วิเคราะห์เป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน

ระหว่างทดลองเก็บตัวอย่างพืชจำนวน 4 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 1 (22 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 2 (29 วันหลังเริ่มทดลอง), ครั้งที่ 3 เก็บตัวอย่างฝักรุ่นที่ 3 (36 วันหลังเริ่มทดลอง) และ ครั้งที่ 4 เก็บตัวอย่างพืชที่เหลืออยู่ทั้งหมด (43 วันหลังเริ่มทดลอง) นำตัวอย่างพืชที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง นำมาวิเคราะห์ทางเคมีเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า



ภาพที่ 5 ช่วงเวลาการปฏิบัติงานของการศึกษาอิทธิพลของฝนจำลองที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน

ระหว่างทดลองได้เก็บข้อมูลสภาพอากาศภายในโรงเรือน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้องการระเหยน้ำของบรรยากาศ การวัดใช้เครื่องมือเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า

นำค่าวิเคราะห์ดินและพืช มาหาค่าต่างๆ เช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของฝนที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต และวิเคราะห์สถิติแบบ CRD 4x4 factorial arrangement และ RCB 4x4x4 factorial arrangement โดยมีปัจจัยศึกษาคือ ชุดดิน ระดับ pH ของน้ำที่เกิดจากอนุมูลซัลเฟต และเวลาในการเก็บตัวอย่าง เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีตเมนต์โดยวิธีของดันแคน (Duncan's new multiple range test, DMRT) (พิศมัย, 2543)

6. สภาพอากาศในโรงเรือน

6.1 ความดันไอน้ำที่บรรยากาศยังรับได้

ค่าความดันไอน้ำที่บรรยากาศยังรับได้ (vapor pressure deficit; VPD) โดยติดตั้งเครื่องเก็บข้อมูลสภาพอากาศแบบอัตโนมัติ บันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของ

อากาศอัตโนมัติทุก 5 นาที ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง นำค่าตัวแปรที่เก็บมาคำนวณความดันไอน้ำที่บรรยากาศยังรับได้ จากสมการ

$$\text{VPD} = p^{sat(T_{air})}(1-\frac{RH}{100})$$

เมื่อ RH = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (relative humidity, %)

$p^{sat(T_{air})}$ = ความดันไอน้ำของบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (kPa) ณ อุณหภูมิ T_{air} (Kelvin) หนึ่ง ๆ

7. <u>พลังงานศักย์น้ำในใบกระเจี๊ยบเขียวในรอบวัน</u>

7.1 พลังงานศักย์น้ำรวมของใบกระเจี๊ยบเขียว (total potential; ψ_t, kPa) ทำการวัด 1 ใบต่อต้นต่อครั้ง โดยวัดในช่วงที่กระเจี๊ยบเขียวให้ผลผลิตฝักรุ่นที่ 1 และ 2 เลือกใบในตำแหน่งที่ 5 จากปลายยอดเป็นใบที่ได้รับแสงเต็มที่ เป็นใบที่ไม่แก่ และไม่อ่อนเกินไป วัดตามวิธีที่เสนอโดย Scholander *et al.* (1965) โดยห่อด้วยพลาสติกถนอมอาหาร (plastic wrap) เพื่อป้องกันการระเหยน้ำ ตัดที่ก้านใบแล้วนำมาวัดด้วยเครื่องอัดความดัน (pressure chamber) อ่านค่าความดันที่เริ่มเห็นฟิล์มของน้ำปรากฏที่ปลายก้านใบ ติดตามวัดศักย์น้ำรวมของทุกตำรับทดลองทุก 4 ชั่วโมง ตั้งแต่ 6:00 ถึง 22:00 น. หลังจากนั้นนำใบกระเจี๊ยบเขียวนั้นใส่ในหลอดพลาสติก ปิดปลายทั้ง 2 ด้านด้วยจุกยาง แล้วแช่ในไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) นาน 5 นาที เพื่อให้เซลล์พืชแตก นำตัวอย่างเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อรอวัดค่าศักย์สารละลายในเซลล์ใบกระเจี๊ยบเขียว ซึ่งจะวัดในห้องปฏิบัติการ บันทึกข้อมูลนี้ทุกตำรับทดลอง ตำรับละ 3 ซ้ำ

7.2 พลังงานศักย์สารละลายในเซลล์ใบกระเจี๊ยบเขียว (solute potential; ψ_π, kPa) นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าออกจากตู้เย็น ผึ่งในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง บดคั้นสารละลาย ใช้ pipette ดูดสารละลาย 10 µl แล้วหยดสารละลายลงบนกระดาษกรองเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร แล้วใส่ในเครื่อง Vapor pressure osmometer ค่าที่ได้นี้เป็นความเข้มข้นรวมของสารละลายทุกชนิด (i) (ΣC_i, mmol kg^{-1}) จากนั้นนำค่า $\sum C_i$ คำนวณค่า ψ_π โดยใช้ความสัมพันธ์ของแวนฮอฟฟ์ (Nobel, 1983)

$$\psi_\pi = -RT\sum C_i$$

เมื่อ R = ค่าคงตัวของก๊าซ, 8.3143×10^{-3} m^3 kPa mol^{-1} K^{-1}

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลาย, K

7.3 พลังงานศักย์ความดันน้ำของใบกระเจี๊ยบเขียว (pressure potential; ψ_p, kPa) บันทึกข้อมูลนี้ทุกตำรับทดลอง คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\psi_p = \psi_t - \psi_\pi$$

8. สัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุอาหารหลักที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณธาตุอาหารหลักทั้งหมดในดิน (K_d)

8.1 สัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณธาตุไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ($_N K_d$) คำนวณได้จาก

$$_N K_d = \frac{\left(NH_4^+\right)_s + \left(NO_3^-\right)_s}{N_T}$$

เมื่อ $\left(NH_4^+\right)_s$ = ปริมาณแอมโมเนียมในดิน (mg kg^{-1})
$\left(NO_3^-\right)_s$ = ปริมาณไนเตรทในดิน (mg kg^{-1})
N_T = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (mg kg^{-1})

8.2 สัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน ($_P K_d$) คำนวณได้จาก

$$_P K_d = \frac{\left(P_2O_5\right)_s}{P_T}$$

เมื่อ $\left(P_2O_5\right)_s$ = ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (mg kg^{-1})
P_T = ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน (mg kg^{-1})

8.3 สัดส่วนระหว่างปริมาณธาตุโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณธาตุโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน ($_K K_d$) คำนวณได้จาก

$$_K K_d = \frac{\left(K_2O\right)_s}{K_T}$$

เมื่อ $(K_2O)_s$ = ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน (mg kg^{-1})
K_T = ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (mg kg^{-1})

9. <u>สัดส่วนการนำธาตุอาหารหลักไปใช้ในกระเจี๊ยบเขียว</u>

9.1 สัดส่วนการนำไนโตรเจนไปใช้ในกระเจี๊ยบเขียว ($N_{T,pt}$) คำนวณได้จาก

$$N_{T,pt} = \frac{(N_T)_{pt} \cdot M_{pt}}{\left((N_{T,0} \cdot M_{S,0}) + N_F\right) - (N_{T,1} \cdot M_{S,1})}$$

เมื่อ $(N_T)_{pt}$ = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในพืช (%)
M_{pt} = น้ำหนักแห้งส่วนต่าง ๆ ของกระเจี๊ยบเขียว (g)
$N_{T,0}$ = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนทดลอง (%)
$M_{S,0}$ = น้ำหนักดินเริ่มต้น (g)
N_F = ปริมาณไนโตรเจนที่ได้จากปุ๋ย (g)
$N_{T,1}$ = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินหลังสิ้นสุดการทดลอง (%)
$M_{S,1}$ = น้ำหนักดินหลังสิ้นสุดการทดลอง (g)

9.2 สัดส่วนการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในกระเจี๊ยบเขียว ($P_{T,pt}$) คำนวณได้จาก

$$P_{T,pt} = \frac{(P_T)_{pt} \cdot M_{pt}}{\left((P_{T,0} \cdot M_{S,0}) + P_F\right) - (P_{T,1} \cdot M_{S,1})}$$

เมื่อ $(P_T)_{pt}$ = ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในพืช (%)
$P_{T,0}$ = ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินก่อนทดลอง (%)
P_F = ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากปุ๋ย (g)
$P_{T,1}$ = ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินหลังสิ้นสุดการทดลอง (%)

9.3 สัดส่วนการนำโพแทสเซียมไปใช้ในกระเจี๊ยบเขียว ($K_{T,pt}$) คำนวณได้จาก

$$K_{T,pt} = \frac{(K_T)_{pt} \cdot M_{pt}}{\left((K_{T,0} \cdot M_{S,0}) + K_F\right) - (K_{T,1} \cdot M_{S,1})}$$

เมื่อ $(K_T)_{pt}$ = ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในพืช (%)

$K_{T,0}$ = ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินก่อนทดลอง (%)

K_F = ปริมาณโพแทสเซียมที่ได้จากปุ๋ย (g)

$K_{T,1}$ = ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินหลังสิ้นสุดการทดลอง (%)

10. สถานที่ทำการทดลอง

1. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทางเคมี ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

2. โรงเรือนปลูกพืชทดลอง ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

3. ห้องปฏิบัติการการอนุรักษ์และการจัดการดิน ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

11. ระยะเวลาในการทดลอง

เริ่มการทดลองตั้งแต่เดือนธันวาคม 2546 ถึง สิงหาคม 2548