



เทคโนโลยีการวัดความเข้มข้นก๊าซในการรมยากำจัดศัตรูผลผลิตการเกษตร: บทความปริทัศน์

Monitoring technology of gas concentration in fumigation: a review

ชูเกียรติ โชติกเสถียร¹, อธิวัฒน์ บุญมี², วรญา เนืองมัจฉา², วัชรพล ชยประเสริฐ^{3*}Chukiat Chotikasatian¹, Atiwat Boonmee², Woraya Neungmatcha², Watcharapol Chayaprasert^{3*}¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม, 73000¹Industrial Education, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140*Corresponding author: Tel: +66-34-351897, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การรมยาถือเป็นวิธีการสำคัญในการควบคุมกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บ ช่วยลดการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษาผลผลิตและผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตร เพื่อให้การรมยาประสบผลสัมฤทธิ์และปฏิบัติงานได้รับความปลอดภัย อุปกรณ์การตรวจวัดความเข้มข้นของสารรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น บทความปริทัศน์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการการทำงานของเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรม และข้อพิจารณาในการเลือกงาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการปฏิบัติงานเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติสำหรับนักวิจัย ผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม และผู้สนใจทั่วไป โดยครอบคลุมอุปกรณ์ลักษณะต่างๆ ได้แก่ หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสี, เซนเซอร์การนำความร้อน, เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า, เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจาย และเซนเซอร์ออปติคัลอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เนื้อหาของบทความมุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจติดตามความเข้มข้น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการรมยา ในช่วงท้ายบทความ มีการวิเคราะห์ถึงแนวโน้มการพัฒนาระบบตรวจวัดความเข้มข้นสารรม เช่น การประยุกต์ใช้ Internet of Things และเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งจะมีความสำคัญในการยกระดับมาตรฐานการรมยาในอนาคต

คำสำคัญ: การรมยา, ความเข้มข้นก๊าซ, การตรวจติดตามความเข้มข้นสารรม, เซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซ

Abstract

Fumigation is one of the most effective methods for controlling insect pests and reducing postharvest losses in stored products. Since accurate measurements of fumigant concentrations are keys to achieving high fumigation efficacy and ensuring personnel safety, this review article aims to provide overall understanding of different technologies in fumigant gas sensors. The working principles as well as criteria for selecting fumigant monitoring devices are discussed. The types of devices discussed include colorimetric tubes, thermal conductivity sensors, electrochemical sensors, non-dispersive infrared sensors and optical interferometers. This article primarily focuses on efficacy monitoring while briefly addressing safety and clearance monitoring to provide contextual comparisons. Future trends toward integrated monitoring systems and wireless sensors are also discussed.

Keywords: fumigation, gas concentration, fumigation concentration monitoring, gas sensor

1 บทนำ

ปัญหาแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored product insect) ที่ก่อกินผลผลิตโดยเฉพาอย่างยิ่งธัญพืช (ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี) ผลิตภัณฑ์แปรรูป (แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง) หรือกากเมล็ดธัญพืชที่เหลือจากการผลิตเอทานอล (ethanol) (distillers

dried grains with solubles - DDGS) ในไซโล โกดัง หรือแม้แต่ระหว่างการขนส่ง เป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมาก (Affognon et al., 2015; Nath et al., 2024) วิธีการกำจัดแมลงดังกล่าวที่ได้รับการยอมรับว่ามีผลสัมฤทธิ์ (efficacy) มากที่สุดวิธีหนึ่งคือ การรมยา หรือ fumigation (Bond, 1984) ซึ่งเป็นการปล่อยก๊าซพิษเข้าสู่

ปริมาตรปิดสนิทเรียกว่า โครงสร้างการรวม (enclosure) เพื่อให้โมเลกุลก๊าซแทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างและรอยแตกต่างๆ ภายในโครงสร้างการรวมได้อย่างทั่วถึง ในอดีต เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide - CH_3Br) ถือเป็นสารรมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ภายใต้ข้อตกลงของพิธีสารมอนทรีออล (Montreal Protocol) (UNEP, 2026) ว่าด้วยสารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน เมทิลโบรไมด์ได้ถูกจัดเป็นสารควบคุมและถูกสั่งลดทอนการใช้งานจนถึงปัจจุบันถูกยกเลิกการใช้ในการรวมผลิตผลและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อการเก็บรักษาทั้งหมด โดยจะสามารถใช้ได้ในการรวมเพื่อการกักกันพืชและก่อนการส่งออก (quarantine and pre-shipment - QPS) เท่านั้น การเปลี่ยนผ่านนี้ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมเกษตรต้องหันมาพึ่งพาสารรมอื่นๆ มากขึ้นเช่น ฟอสฟีน (phosphine - PH_3) และ ซัลฟิวริลฟลูออไรด์ (sulfuryl fluoride - SO_2F_2) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สารรมอื่นๆ ก็มีคุณสมบัติเฉพาะซึ่งอาจทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานได้ ยกตัวอย่างเช่น หากถูกใช้งานอย่างไม่เหมาะสม (การใช้สารรมในอัตราที่ไม่เหมาะสม, การรวมยาไม่ครบระยะเวลา, การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอ) แผลงจะมีความต้านทานต่อก๊าซฟอสฟีนเพิ่มขึ้นได้ (แผลงคือยา) (Reichmuth et al., 2004; Nayak et al., 2013; Pengkum et al., 2018) สำหรับซัลฟิวริลฟลูออไรด์ เนื่องจากยังคงมีต้นทุนที่สูง จึงทำให้การใช้งานยังอยู่ในวงจำกัด อีกทั้งสารดังกล่าวยังถูกจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกที่มีค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูง (global warming potential) (Mühle et al., 2009) ส่งผลให้มีการเฝ้าระวังในการใช้งานมากขึ้น จะเห็นได้ว่า การพึ่งพาสูตรสำเร็จในการปฏิบัติงานรมยาที่ใช้แนวทางเดียวกันกับทุกสารรมในทุกสถานการณ์อาจไม่เพียงพอ แนวคิดการรวมยาแบบแม่นยำ (precision fumigation) จึงถูกพัฒนาขึ้น (Williams et al., 2000; Schneider et al., 2003) เพื่อยกระดับให้การดำเนินการรวมยาอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลการรวมยาจริงมากขึ้น กับการอาศัยประสบการณ์หรือค่ามาตรฐานทั่วไปเพียงอย่างเดียว แนวคิดการรวมยาแบบแม่นยำสามารถปรับใช้ได้กับทุกๆ สารรม โดยมีหัวใจสำคัญคือ การตรวจวัดความเข้มข้นสารรมอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการรวม เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับประเมินผลสัมฤทธิ์การกำจัดแมลง โดยทั่วไป ผลสัมฤทธิ์ของการรวมยาจะถูกประเมินจากร้อยละการตายของแมลง (percent mortality) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถคาดการณ์ได้จากค่า Ct product (concentration-time product) (ความเข้มข้นสะสมตามเวลา) (Gandy and Chanter, 1976; Annis, 1999) ดังแสดงใน Eq. 1

$$Ct = \frac{-C_i \cdot HLT \cdot \left(2^{-\frac{t}{HLT}} - 1\right)}{\ln(2)} \quad (1)$$

ซึ่งก็คือ การหาปริพันธ์ (integration) ของสมการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรวมยา ซึ่งอยู่ในรูปของการประมาณค่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (first-order kinetic approximation) ดังแสดงใน Eq. 2 (Cryer, 2008; Chayaprasert and Maier, 2024)

$$C_t = \frac{C_i}{2^{\frac{t}{HLT}}} \quad (2)$$

โดยที่ C_i คือ ความเข้มข้นสารรม ณ เวลาเริ่มต้น (initial concentration), t คือ ระยะเวลาการรวมยาที่ผ่านไป (elapsed time), C_t คือ ความเข้มข้นสารรม ณ เวลา t และ HLT คือ half-loss time หรือระยะเวลาความเข้มข้นสารรมลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าคงที่

ในระหว่างการรวมยา หากความเข้มข้นสารรมลดต่ำกว่าระดับวิกฤตในช่วงเวลาใดช่วงเวลานึง อาจทำให้ค่า Ct product ไม่ถึงระดับที่สามารถกำจัดแมลงได้ทั้งหมด ซึ่งในระยะยาวจะเป็นการเร่งกระบวนการคัดเลือกประชากรแมลงที่ต้านทานสารรม นอกจากนี้ ผลการวัดความเข้มข้นสารรมยังเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงการสูญเสียสารรมจากการรั่วไหลออกจากโครงสร้างการรวม และการที่ก๊าซสารรมถูกดูดซับเข้าสู่วัสดุที่ถูกรวมยาอยู่ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับปริมาณการปล่อยสารรมหรือระยะเวลาการรวมให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ช่วยลดความเสี่ยงของการใช้สารรมเกินความจำเป็น ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตผลจากการมีสารพิษตกค้างเกินค่ามาตรฐานความปลอดภัย (maximum residue limit - MRL) การเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานโดยไม่จำเป็น รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานจากการระบายก๊าซส่วนเกินสู่บรรยากาศ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การตรวจติดตามความเข้มข้นสารรม (fumigant concentration monitoring) จึงมีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของการรวมยา ทั้งในแง่ของการประเมินผลสัมฤทธิ์การกำจัดแมลง และการใช้สารรมอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานและเงื่อนไขการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซแต่ละประเภทเช่น ช่วงการวัด (measurement range) หรือช่วงอายุการ (lifespan) ของเซนเซอร์ เป็นต้น เพื่อให้การรวมยาประสบผลสำเร็จ ทั้งในมิติของผลสัมฤทธิ์ทางชีวภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชิงเทคนิคของอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นมักกระจุกตัวกระจายอยู่ในคู่มือของผู้ผลิตหรือเอกสารการใช้งานเฉพาะกิจ และแหล่งข้อมูลที่แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและข้อจำกัดภายใต้บริบทของการรวมยากำจัดศัตรูผลผลิตทางการเกษตรยังคงมีอยู่น้อย บทความปริทัศน์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการทำงานของเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซในงานรมยากำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บ และข้อพิจารณาในการเลือกงาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการ

ปฏิบัติงานเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติสำหรับนักวิจัย ผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม และผู้สนใจทั่วไป

2 บริบทการใช้งานอุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรม

การตรวจวัดความเข้มข้นสารรมในการรมยาสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามวัตถุประสงค์ได้แก่ (1) การวัดเพื่อตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์ (efficacy monitoring) และ (2) การวัดเพื่อความปลอดภัย (safety/clearance monitoring) โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์หนึ่งมักไม่สามารถนำไปใช้เพื่ออีกวัตถุประสงค์ได้ (Chayaprasert and Maier, 2024) อุปกรณ์วัดเพื่อตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์สามารถวัดค่าความเข้มข้นในย่านที่สูง โดยปกติอยู่ในช่วงหลักร้อยถึงหลักหมื่นส่วนในล้านส่วน (part per million - ppm) การวัดเพื่อความปลอดภัยมีเป้าหมายเพื่อยืนยันว่า หลังเสร็จสิ้นการรมยาโครงสร้างการรมได้รับการระบายอากาศ (ventilation) จนกระทั่งความเข้มข้นของสารรมลงถึงระดับปลอดภัยและสามารถอนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานกลับเข้าปฏิบัติ (re-entry) ในโครงสร้างการรมได้ อุปกรณ์ในกลุ่มนี้จึงต้องมีเซนซิวิตี (sensitivity) สูงเพื่อให้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นในระดับต่ำมากได้อย่างแม่นยำ ค่าความเข้มข้นระดับปลอดภัยดังกล่าวมักอ้างอิงจากค่า threshold limit value (TLV) ซึ่งกำหนดแตกต่างกันไปตามชนิดของสารรม ตัวอย่างเช่น ก๊าซฟอสฟีนมีค่า TLV ต่ำเพียง 0.3 ppm ทั้งนี้ บทความปริทัศน์นี้มุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเข้มข้นสารรมเพื่อการตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์ของการรมยาเป็นหลัก

3 หลักการและเทคนิคการวัดความเข้มข้นสารรม

อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซในงานรมยาผลิตผลและผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีหลักการทำงานที่หลากหลายแตกต่างกัน เทคโนโลยีที่พบได้บ่อยได้แก่

3.1 หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสี (colorimetric tube - CT)

หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสีเป็นหลอดแก้วบรรจุสารเคมีที่ทำหน้าทีเป็นรีเอเจนต์ (reagent) ติดตั้งใช้งานร่วมกับปั๊มดูดที่ใช้มือบีบหรือดึง ซึ่งได้รับการออกแบบให้มีปริมาตรการดูดคงที่และสอบเทียบมาเฉพาะสำหรับการวัดความเข้มข้นก๊าซ (Figure 1) เมื่อปั๊มดูดก๊าซสารรมที่ผสมอยู่ในอากาศผ่านหลอดวัดก๊าซ สารเคมีในหลอดจะทำปฏิกิริยากับสารรมและเปลี่ยนสี ความเข้มข้นสารรมจะเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความยาวหรือความเข้มของแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากสเกล (scale) ที่พิมพ์กำกับบนหลอด วิธีการนี้มีข้อดีคือ โครงสร้างอุปกรณ์เรียบง่าย ไม่ต้องพึ่งพาระบบไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาต่ำ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานภาคสนาม อย่างไรก็ตาม หลอดวัดก๊าซเป็นอุปกรณ์ใช้ครั้งเดียว (single-use) ทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้งานต่อครั้งสูงกว่าอุปกรณ์ลักษณะอื่น อีกทั้งอาจมีความไม่แน่นอนของการอ่านค่าด้วยสายตาของผู้ปฏิบัติงาน

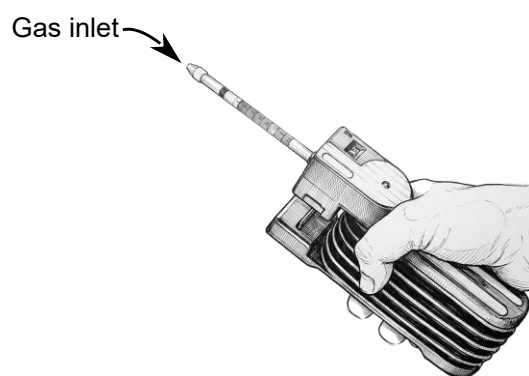


Figure 1 A hand pump with a colorimetric tube.

Adapted from: Wuensch Sales (2026)

3.2 เซนเซอร์การนำความร้อน (thermal conductivity sensor - TC)

เซนเซอร์การนำความร้อนอาศัยการวัดความแตกต่างของค่าการนำความร้อนระหว่างสารรมและก๊าซอ้างอิง (มักเป็นอากาศ) ภายในโครงสร้างเซนเซอร์จะประกอบด้วยเส้นลวดนำความร้อน (heated filament) หรือเทอร์มิสเตอร์ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และถูกจัดเรียงในวงจรวิสต์อนบริดจ์ (Wheatstone bridge) (Figure 2a) เมื่อก๊าซสารรมผสมอากาศไหลผ่านเซนเซอร์ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากเส้นลวดจะเปลี่ยนไปตามความสามารถในการนำความร้อนเฉพาะตัวของก๊าซชนิดนั้นๆ ส่งผลให้อุณหภูมิและค่าความต้านทานไฟฟ้าของเส้นลวดเปลี่ยนแปลง ก่อให้เกิดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage signal) ในวงจรที่แปรผันตรงกับความเข้มข้นสารรม เซนเซอร์ลักษณะนี้เหมาะกับการวัดในย่านความเข้มข้นสูงระดับ % (เปอร์เซ็นต์) หรือ g/m^3 (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เช่น เครื่อง Fumiscope (Key Chemical & Equipment Co, 2022) ดังแสดงใน Figure 2b เนื่องจากเซนเซอร์ทำงานบนหลักการทางอุณหพลศาสตร์โดยปราศจากปฏิกิริยาเคมีหรืออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ทำให้เซนเซอร์ไม่เสื่อมสลายไปตามปริมาณการใช้ (non-depleting) ส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ตอบสนองค่อนข้างรวดเร็ว และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ก๊าซตัวอย่างมีส่วนประกอบเป็นสารรมหลากหลายชนิด (mixtures of fumigants) เซนเซอร์การนำความร้อนมักให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน (Bond, 1984) เนื่องจากเซนเซอร์มีความจำเพาะเจาะจงต่ำ (low selectivity) จึงไม่สามารถแยกแยะชนิดของก๊าซได้อย่างเด็ดขาดหากมีก๊าซแปลกปลอมหรือก๊าซหลายชนิดผสมกัน

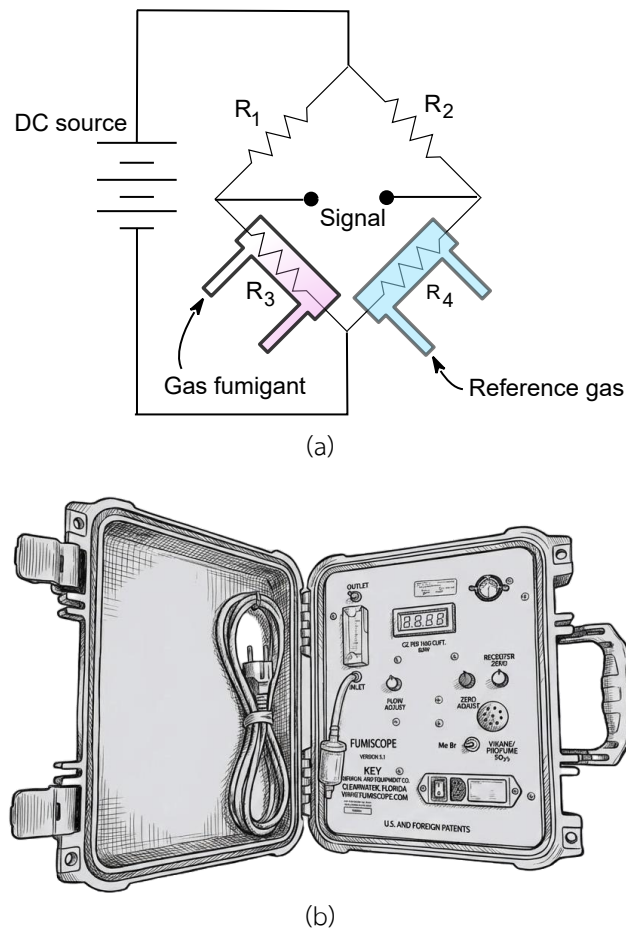


Figure 2 (a) An example of a Wheatstone bridge circuit of a thermal conductivity gas sensor and (b) Fumiscopes.

Adapted from: (a) Wikimedia Commons contributors (2020) and (b) SGT Service (2026)

3.3 เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor - EC)

เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) โดยภายในกระเปาะเซนเซอร์จะประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้าได้แก่ working electrode (WE), reference electrode (RE) และ counter electrode (CE) ซึ่งถูกห่อหุ้มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) (Figure 3) เมื่อสารมลพิษอากาศไหลผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรน (membrane) โมเลกุลก๊าซจะแพร่ผ่านไปขั้ว WE และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและสร้างกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กในระดับไมโครแอมแปร์ (microampere) ที่ขั้ว CE จะเกิดปฏิกิริยาสมดุลในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อรักษาสมดุลประจุของระบบ ขั้ว RE ทำหน้าที่ควบคุมและคงค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงให้เสถียร ช่วยให้การควบคุมศักย์ที่ขั้ว WE มีความแม่นยำมากขึ้น ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารมลพิษ กระแสระดับไมโครแอมแปร์นี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันผ่านวงจรโพเทนชิโอสแตต (potentiostat) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว WE และ RE ให้คงที่

พร้อมทั้งขยายสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ก่อนส่งต่อไปยังระบบแสดงผลหรือบันทึกข้อมูลต่อไป

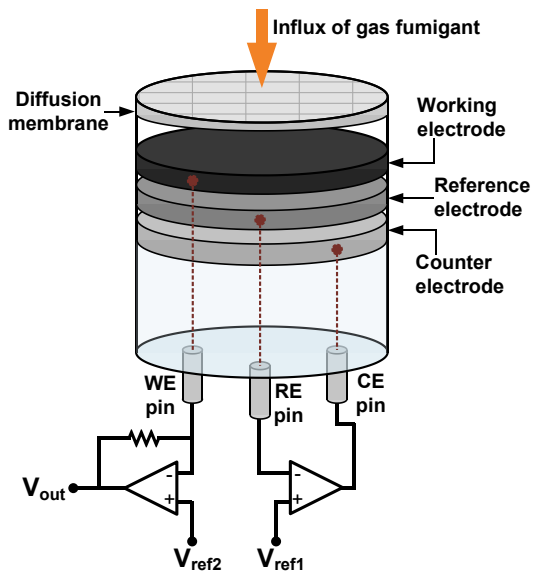


Figure 3 A simplified schematic of an electrochemical gas sensor.

จุดเด่นของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้ามีเซนซิวิตีที่มีความละเอียดของการวัดถึงระดับ 1 ppm หรือต่ำกว่า สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นเชิงเส้นสะดวกต่อการคำนวณประมวลผล เซนเซอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ (low power consumption) จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ไร้สายหรือเครื่องมือพกพาที่ทำงานผ่านแบตเตอรี่ได้ต่อเนื่องยาวนาน อีกทั้ง ยังมีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้เซนเซอร์กลุ่มนี้ จำเป็นต้องพิจารณาถึง ครอสเซนซิวิตี (cross-sensitivity) หรือความอ่อนไหวต่อก๊าซที่ไม่ใช่ก๊าซเป้าหมาย เนื่องจาก โดยทั่วไปวัสดุอิเล็กโทรดมักตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่นที่ไม่ใช่ก๊าซเป้าหมาย ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ที่ถูกออกแบบสำหรับวัดความเข้มข้นก๊าซฟอสฟีน อาจแสดงค่าผิดพลาดหากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปะปนอยู่ในก๊าซตัวอย่าง ข้อพิจารณาประการถัดมาคือ ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิและความชื้น (temperature and humidity dependence) ซึ่งทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความผิดพลาดจากค่าที่สอบเทียบไว้เมื่อเซนเซอร์ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ร้อนหรือแห้งจัด นอกจากนี้ เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเสื่อมสภาพตามปริมาณการใช้งาน อายุการใช้งานของเซนเซอร์กลุ่มนี้จึงจำกัดอยู่ในช่วง 1-3 ปี

3.4 เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจาย (non-dispersive infrared - NDIR)

เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจายมีหลักการทำงานตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ซึ่งอธิบายว่า ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นก๊าซและระยะทางที่แสงเดินทางผ่านก๊าซนั้น ดังแสดงใน Eq. 3

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (3)$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance), ε คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์บิวิตี (molar absorptivity), c คือ ความเข้มข้นก๊าซเป้าหมาย และ l คือ ระยะทางเชิงแสง (optical path length) ที่แสงต้องเดินทางผ่านก๊าซ Figure 4 แสดงโครงสร้างหลักของเซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซด้วยเทคนิค NDIR ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR source) ที่ส่องแสงผ่านหลอดนำแสง (optical tube) ผนังภายในหลอดจะถูกเคลือบด้วยวัสดุสะท้อนแสง ที่ปลายหลอดจะมีตัวกรองแสง (optical filter) ซึ่งจะยอมให้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับความถี่การสั่นพ้องของโมเลกุลก๊าซเป้าหมาย (vibrational resonance) ผ่านได้ แสงที่ส่องผ่านตัวกรองจะถูกวัดความเข้มด้วยตัวตรวจจับ (IR detector) Eq. 3 สามารถถูกจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ณ แหล่งกำเนิด (I), ความเข้มแสง ณ ตัวตรวจจับ (I_0) และความเข้มข้นก๊าซเป้าหมาย (c) ได้ดังแสดงใน Eq. 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นจำเพาะส่องผ่านก๊าซสารรวมโมเลกุลก๊าซจะดูดกลืนพลังงาน ทำให้ความเข้มแสงที่ตรวจจับได้ลดลงตามสัดส่วนของความเข้มข้น

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot l} \quad (4)$$

เมื่อ $k = \ln(10) \cdot \varepsilon$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของก๊าซเป้าหมาย ณ ความยาวคลื่นเฉพาะ (absorption coefficient)

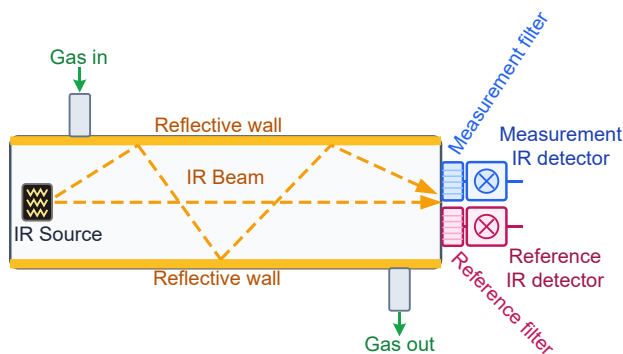


Figure 4 A simplified schematic of an NDIR gas sensor.

เซนเซอร์ NDIR วัดคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซตัวอย่างโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ จึงแทบไม่เกิดการเสื่อมสภาพของเซนเซอร์ ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเซนเซอร์ประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ เซนเซอร์ NDIR จะมีคอสเซนซิวิตีต่ำ เนื่องจาก สามารถเลือกใช้ตัวกรองแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นให้ตรงกับค่าการสั่นพ้องของโมเลกุลก๊าซสารรวมได้ และมักไม่มีก๊าซอื่นที่มีความถี่การสั่นพ้องอยู่ในช่วงเดียวกัน เพื่อแก้ปัญหาความเสื่อมของแหล่งกำเนิดแสงตามกาลเวลา เซนเซอร์ NDIR ขึ้น

สูงมักออกแบบให้มีช่องสัญญาณอ้างอิง (reference channel) ซึ่งวัดแสงในย่านความยาวคลื่นที่ไม่มีก๊าซใดดูดกลืน เพื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบและหักล้างค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการวัด ในการประมวลผลสัญญาณจำเป็นต้องมีการชดเชยผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน และปริมาณความชื้นในอากาศ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้คือต้องการพลังงานไฟฟ้าในการขับแหล่งกำเนิดแสง จึงอาจทำให้อุปกรณ์ใช้งานในลักษณะพกพามีน้ำหนักมาก ณ ปัจจุบันเซนเซอร์ NDIR ยังคงมีราคาสูงกว่าเซนเซอร์ประเภทอื่นๆ อยู่ ถึงแม้ว่าจะมีการปรับตัวลดลงอย่างต่อเนื่อง

3.5 เซนเซอร์ออปติคัลอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (optical interferometer - OI)

เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการวัดความแตกต่างของดัชนีหักเหแสง (refractive index) ระหว่างก๊าซตัวอย่างกับก๊าซอ้างอิง (มักเป็นอากาศ) เป็นตัวแปรหลักในการคำนวณความเข้มข้น กลไกหลักของการวัดคือ การแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็นสองเส้นทางได้แก่ ช่องตัวอย่าง (sample cell) และช่องอ้างอิง (reference cell) (Figure 5) เมื่อองค์ประกอบของก๊าซในช่องตัวอย่างเปลี่ยนแปลง ดัชนีหักเหแสงก็จะเปลี่ยนตาม ทำให้ระยะทางเชิงแสง (optical path length) แตกต่างจากช่องอ้างอิง ผลที่เกิดตามมาคือ การเลื่อนเฟส (phase shift) ของคลื่นแสง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลวดลายการแทรกสอด (interference pattern) ที่ตรวจจับได้ด้วยตัวรับสัญญาณแสง สัญญาณที่ได้จะได้รับการประมวลผลเชิงดิจิทัล (digital processing) ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) เพื่อวิเคราะห์การเลื่อนเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป และคำนวณความเข้มข้นของก๊าซได้

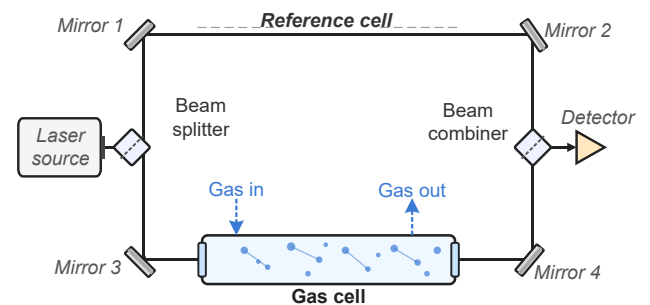


Figure 5 A simplified schematic of an OI gas sensor.

เทคโนโลยีนี้ไม่พึ่งพาปฏิกิริยาเคมีจึงมีเสถียรภาพสูง อีกทั้งยังมีความสามารถในการรองรับก๊าซหลายชนิดภายในเครื่องเดียว (multi-gas capability) เนื่องจากเทคนิค OI ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหแสงโดยรวม จึงสามารถกำหนดสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับก๊าซแต่ละชนิดหรือส่วนผสมแต่ละแบบไว้ในซอฟต์แวร์ ผู้ใช้งานเพียงเลือกชนิดก๊าซในโปรแกรม เซนเซอร์จะประมวลผลด้วยพารามิเตอร์ (parameter) ของแบบจำลองที่สอดคล้องกัน โดยไม่จำเป็นต้อง

เปลี่ยนโมดูลเซนเซอร์ นอกจากจะใช้วัดความเข้มข้นของก๊าซเมทิลโบรไมด์และฟอสฟีนแล้ว เครื่องวัดความเข้มข้นด้วยหลักการ OI ยังสามารถใช้ได้กับก๊าซอีเทนไดไนล์ (ethanedinitrile) ซึ่งเป็นสารรมที่ใช้ในการรมท่อนซุง (log fumigation) (Environmental Protection Authority, 2019) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของหลักการ OI อยู่ที่ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน เนื่องจากดัชนีหักเหของก๊าซแปรผันตามความหนาแน่นของก๊าซ หากไม่มีการควบคุมหรือการชดเชยที่แม่นยำ ความผันผวนของอุณหภูมิ และ/หรือความดันบรรยากาศ อาจส่งผลต่อค่าความเข้มข้นก๊าซที่วัดได้

4 หน่วยวัดความเข้มข้นสารรม

นอกจากหน่วย ppm แล้ว ความเข้มข้นสารรมมักถูกแสดงในหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3) กล่าวคือ หน่วยความเข้มข้นโดยปริมาตร โดยที่การแปลงค่าระหว่างทั้งสองหน่วยสามารถทำได้โดยใช้ Eq. 5 (Chayaprasert and Maier, 2024)

$$ppm = \frac{c \cdot R \cdot T}{M \cdot P} \cdot 10^6 \quad (5)$$

โดยที่ c คือ ความเข้มข้นสารรม (g/m^3), R คือ ค่าคงที่ก๊าซอุดมคติ ($82.05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$), T คือ อุณหภูมิ (K), M คือ มวลโมเลกุลสารรม (g/mol), P คือ ความดัน (atm) หน่วยความเข้มข้นโดยปริมาตร อีกหนึ่งหน่วยที่นิยมใช้คือ ออนซ์ต่อพันลูกบาศก์ฟุต (oz/Mcf หรือ oz/1,000 ft^3) ทั้งนี้ สัดส่วนระหว่างหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหน่วย ออนซ์ต่อพันลูกบาศก์ฟุต มีค่าประมาณ 1 (1.0012) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการแปลงหน่วยความเข้มข้นสารรมใดๆ อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ ความดัน และมวลโมเลกุลของสารรมนั้นๆ

¹ Table 1 Comparison of gas concentration monitoring technologies used in fumigation applications

Type	Fumigant (Example)	Application	Examples of commercial models	Measurement range	Accuracy	Features	Usage considerations
CT	PH ₃	Efficacy	Dräger tubes (Dräger, 2022)	25 - 10,000 ppm	±10 - 15% (standard deviation)	Low initial cost, and no power source needed	Single-use, and low accuracy
	Multiple	Clearance		0.1 - 3, 1 -5, 0.1 - 50 ppm*	±15 - 30% (standard deviation)*		
TC	CH ₃ Br and SO ₂ F ₂	Efficacy	Fumiscopes (Key Chemical & Equipment Co, 2022)	0 - 2,999 g/m ³	±2% (full scale)	Simple and rugged construction	Low gas selectivity
EC	PH ₃	Efficacy	Silo-Chek (The Canary Company, 2022)	0 - 2,000 ppm	Data not available	High sensitivity and low power consumption	Prone to cross-sensitivity, and short lifespan
	PH ₃	Clearance	DrägerSensor XXS PH ₃ (Dräger, 2026)	0 - 20 ppm	±2%		
NDIR	PH ₃	Efficacy	PM100 (Spectros Instruments, 2026)	0 - 10,000 ppm	±3% (full scale)	High accuracy, non-depleting sensors, and low cross-gas interference	High equipment cost, and consumes more electrical power
	SO ₂ F ₂	Clearance	Fumispec Lo (Uniphos Envirotronic, 2026)	0 - 100 ppm	±2%		
OI	CH ₃ Br, SO ₂ F ₂ and PH ₃	Efficacy	FI-8000 (Riken Keiki Co, 2021)	0 - 50 to 0 - 200 g/m ³ *	±3%	Multiple-gas capability	Compensation for environmental effects needed

² Depending on the model targeting a specific fumigant

³

Table 2 Threshold limit values (TLV) and typical working concentrations of some common fumigants

Fumigant	TLV	Typical concentrations during fumigation
CH ₃ Br	1.0 ppm (Graver, 2004)	515 - 25,700 ppm (Graver, 2004)
PH ₃	0.3 ppm (Graver, 2004)	70 - 3,500 ppm (Graver, 2004)
SO ₂ F ₂	5.0 ppm* (NIOSH, 2014)	30,720 ppm** (Douglas Products, 2017a)

*One of the product labels (Douglas Products, 2017a) require below 1.0 ppm for re-entry

**Maximum allowed concentration

5 ข้อพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์วัดความเข้มข้นในงานรมยา

ในการเลือกอุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรม คุณสมบัติทางเทคนิคของเซนเซอร์ไม่ใช่ปัจจัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวที่ต้องคำนึงถึงเท่านั้น การเลือกใช้งานเซนเซอร์ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยรอบด้านอื่นๆ ร่วมด้วย ข้อดี ข้อจำกัด และบริบทการใช้งานที่เหมาะสมของเซนเซอร์แต่ละประเภทถูกสรุปอยู่ใน Table 1 ซึ่งสามารถใช้เป็นกรอบเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้งานเซนเซอร์ในงานรมยา ประเด็นพื้นฐานที่สุดในการเลือกอุปกรณ์คือ การเลือกอุปกรณ์สอดคล้องกับชนิดของสารรม สารรมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่กำหนดข้อจำกัดของเทคโนโลยีการตรวจวัดโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ฟอสฟีนมีคุณสมบัติกัดกร่อนโลหะบางชนิดแต่สามารถตอบสนองได้ดีกับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า ในกรณีของ เมทิลโบรไมด์และซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ซึ่งมีเสถียรภาพทางเคมีสูง อาจไม่เหมาะกับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า การวัดจึงมักใช้เซนเซอร์การนำความร้อน หรือฟิงพาเทคโนโลยี NDIR หรือ OI ประเด็นพื้นฐานถัดมาคือ การพิจารณาช่วงการวัดที่ต้องสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นเป้าหมายที่ต้องการวัด Table 2 แสดงตัวอย่างความเข้มข้นสำหรับการรมยาโดยทั่วไป และความเข้มข้นระดับปลอดภัยของเมทิลโบรไมด์, ฟอสฟีน และซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับความเข้มข้นสารรมเพื่อหวังผลสัมฤทธิ์ (efficacy) ของการรมยา และระดับความเข้มข้นปลอดภัยมีความแตกต่างกันหลายเท่า ดังนั้น อุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรมสำหรับสองวัตถุประสงค์นี้จึงไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ นอกจากนี้ ช่วงการวัดของอุปกรณ์ต้องสอดคล้องกับอัตราการให้สารรม (dose rate) ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นก๊าซโดยตรง หากอุปกรณ์มีช่วงการวัดแคบเกินไป ความเข้มข้นสารรมในช่วงเริ่มต้นอาจมีค่าสูงเกินกว่าที่อุปกรณ์จะวัดค่าได้ ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าสำหรับก๊าซฟอสฟีนโดยทั่วไปมีช่วงวัดที่ 0 - 2,000

ppm ซึ่งหากมีการใช้สารรมที่อัตราสูง จะไม่สามารถวัดความเข้มข้นในช่วงเริ่มต้นของการรมได้ ความแม่นยำ (accuracy) เป็นปัจจัยสำคัญในการยืนยันผลสัมฤทธิ์การรมยาและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องพิสูจน์ผลการรมยาเพื่อการส่งออกหรือการตรวจสอบย้อนกลับ (traceability) ตามระบบคุณภาพ (quality system) หากอ้างอิงข้อมูลจากผู้ผลิต สำหรับอุปกรณ์ใหม่โดยทั่วไปจะมีความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ถึง $\pm 3\%$ full-scale (Riken Keiki Co, 2021; Spectros Instruments, 2022; Uniphos Envirotronic, 2022) ในระหว่างอายุการใช้งาน อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซทุกประเภทต้องได้รับการสอบเทียบ (calibration) ตามรอบระยะเวลาที่กำหนด (โดยทั่วไป 1 - 2 ครั้งต่อปี) นอกจากนี้ ก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งาน อุปกรณ์ควรได้รับทวนสอบ (verification) โดยการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซที่ทราบค่า เพื่อยืนยันความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ก่อนการใช้งานในแต่ละครั้ง เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซมักมีการติดตั้งฟิวเตอร์ (filter) และตัวดักความชื้น (moisture trap) เพื่อกำจัดฝุ่นละอองและความชื้นส่วนเกินก่อนที่จะก๊าซสารรมจะเข้าสู่เครื่อง ผู้ปฏิบัติงานจึงควรให้ความสำคัญกับการตรวจสอบและเปลี่ยนวัสดุชุดความชื้นรวมถึงฟิวเตอร์อย่างสม่ำเสมอตามรอบการบำรุงรักษาและสภาพการใช้งานจริง (Regulation and Assurance Branch, 2018) นอกจากนี้ประเด็นที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ปัจจัยอื่นๆ ที่ควรพิจารณาได้แก่ ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (ราคาจัดซื้อ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบและการซ่อมบำรุง), ความทนทานของอุปกรณ์, ความง่ายต่อการใช้งานภาคสนาม, ความสามารถอื่นๆ เช่น การทำงานโดยอัตโนมัติ หรือการเชื่อมต่อกับ Internet of Things (IoT) เพื่อการเข้าถึงข้อมูลระยะไกล เป็นต้น

6 แนวโน้มการพัฒนาในอนาคต

ในต่างประเทศ ทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรมกำลังเปลี่ยนผ่านจากเครื่องมือวัดเชิงเดี่ยว (stand alone) ไปสู่ระบบตรวจติดตามแบบบูรณาการ (integrated monitoring system) ที่เชื่อมโยงข้อมูลความเข้มข้นสารรม เข้ากับการวิเคราะห์ และการควบคุมกระบวนการรมยาอย่างเป็นระบบ ยกตัวอย่างเช่น Fumiguide (Douglas Products, 2017b) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ (software) เพื่อการวางแผน บริหารจัดการ ควบคุม วิเคราะห์และติดตามผลการรมยาด้วยสารรมซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ ในขั้นตอนการวางแผนระบบจะช่วยกำหนดปริมาณการปล่อยสารรมหรือโดส (dose) ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากชนิดและช่วงชีวิต (life stage) ของแมลงเป้าหมายที่ต้องการกำจัด ด้านการบริหารจัดการ ข้อมูลทั้งปริมาณและตำแหน่งที่มีการปล่อยสารรม รวมถึงจัดเก็บข้อมูลผลการวัดความเข้มข้นก๊าซจากจุดต่างๆ จะถูกบันทึกไว้ในซอฟต์แวร์อย่างเป็นระบบ ในขณะที่ส่วนของการควบคุม (control) ระบบจะทำการประมวลผลเพื่อประมาณอัตราการรั่วไหล (leakage rate) ของสารรม ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงาน

สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับความจำเป็นในการปล่อยสารรมเพิ่มเติม (top-up) เพื่อรักษาความเข้มข้นให้เป็นไปตามเกณฑ์ ในมิติของการวิเคราะห์ผล ระบบจะคำนวณค่า Ct product เพื่อประเมินร้อยละการตายของแมลง

ความก้าวหน้าด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) และ IoT ช่วยสนับสนุนให้เกิดการพัฒนา ระบบตรวจวัดก๊าซอัตโนมัติเชิงพาณิชย์สามารถเชื่อมต่อข้อมูลไปยังเว็บหรือสมาร์ตโฟนแอปพลิเคชัน (web or smartphone applications) (Spectros Instruments, 2022; Uniphos Envirotronic, 2022) ซึ่งทำให้การเข้าถึงข้อมูลการรมยาสะดวกรวดเร็วกว่าขึ้น ระบบดังกล่าวยังช่วยลดข้อผิดพลาดในการปฏิบัติงานจากความสามารถในการส่งสัญญาณเตือน หากตรวจพบการลดลงของความเข้มข้นก๊าซอย่างผิดปกติ นอกจากนี้ ในอนาคต ระบบอาจถูกพัฒนาให้บูรณาการเข้ากับการตรวจสอบย้อนกลับ, ระบบบริหารจัดการคุณภาพ (quality management system), ระบบวางแผนทรัพยากรองค์กร (enterprise resource planning) หรือระบบออกใบรับรองสุขอนามัยพืชในรูปแบบดิจิทัล ต่อไปอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับการพัฒนา คือ เทคโนโลยีเซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor) (Brabec et al., 2019; Brabec et al., 2022; Centaur Analytics, 2023) โดยโครงสร้างของเซนเซอร์ถูกออกแบบให้สามารถป้องกันก๊าซ (gas proof) ไม่สามารถรั่วซึมเข้าถึงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในได้ การกำหนดตำแหน่งตรวจวัดความเข้มข้นสารรมจึงมีความสะดวกมากขึ้นจากเดิมที่ต้องอาศัยการวางท่อพลาสติกจากภายในโครงสร้างการรมออกมาสู่อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซภายนอก อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีเซนเซอร์ไร้สายดังกล่าวยังคงอยู่ในช่วงระหว่างการพัฒนา และพัฒนา ซึ่งยังมีประเด็นเชิงเทคนิคที่ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การับสัญญาณเมื่อต้องติดตั้งเซนเซอร์ภายในโครงสร้างโรงเก็บที่เป็นโลหะ เป็นต้น พัฒนาการต่างๆ ข้างต้นสะท้อนให้เห็นว่าเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรมมีส่วนสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความโปร่งใสของกระบวนการรมยาโดยรวม อีกทั้ง ยังเป็นการยกระดับมาตรฐานการรมยา ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร

7 เอกสารอ้างอิง

Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., Borgemeister, C. 2015. Unpacking postharvest losses in sub-Saharan Africa: a meta-analysis. *World Development* 66, 49-68.

Annis, P.C. 1999. The relative effects of concentration, time, temperature and other factors in fumigant treatments. In: Jin, Z., Liang, Q., Liang, Y., Tan, X., Guan, L. (Eds). *Proceedings of the Seventh International Working Conference on Stored Product Protection*, 331-337. Sichuan

Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China. 14-19 October 1998, Beijing, China.

Bond, E.J. 1984. *Manual of fumigation for insect control*, FAO Plant Production and Protection Papers - 54, Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Brabec, D., Kaloudis, E., Athanassiou, C.G., Campbell, J., Agrafioti, P., Scheff, D.S., Bantas, S., Sotioudas, V. 2022. Fumigation Monitoring and Modeling of Hopper-Bottom Railcars Loaded with Corn Grits. *Journal of Biosystems Engineering* 47, 358-369.

Brabec, D.L., Campbell, J., Arthur, F., Casada, M., Tilley, D., Bantas, S. 2019. Evaluation of Wireless Phosphine Sensors for Monitoring Fumigation Gas in Wheat Stored in Farm Bins. *Insects* 10(5), 121.

Centaur Analytics. 2023. Intelligent pest management and fumigation. Centaur Analytics Inc. Available at: <https://centaur.ag/pest-control-and-fumigations/>. Accessed on 19 March 2023.

Chayaprasert, W., Maier, D.E. 2024. Fumigation process using chemicals and controlled or modified atmospheres. In: Jayas, D.S. (Ed.), *Control and Management of Pests in Stored Products* (pp. 190-240). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Cryer, S.A. 2008. Predicted gas loss of sulfuryl fluoride and methyl bromide during structural fumigation. *Journal of Stored Products Research* 44(1), 1-10.

Douglas Products. 2017a. Applicator manual for ProFume[®] gas fumigant. (Liberty, Missouri, United States of America: Douglas Products and Packaging Co LLC.

Douglas Products. 2017b. Maximizing resources: Fumiguide[™] program helps flour mill achieve fumigation success. (Liberty, Missouri, United States of America: Douglas Products and Packaging Company LLC.

Dräger. 2022. Dräger short-term tubes. Drägerwerk AG & Co. KGaA. Available at: https://www.draeger.com/en_seeur/Products/Short-term-Tubes?s=354. Accessed on 22 February 2022.

- Dräger. 2026. DrägerSensor® XXS PH₃. Drägerwerk AG & Co. KGaA. Available at: <https://static.draeger.com/www/sensors/en/6810886.pdf>. Accessed on 30 April 2026.
- Environmental Protection Authority. 2019. Application for approval to import EDN for release. (Wellington, New Zealand: Environmental Protection Authority, New Zealand Government.
- Gandy, D.G., Chanter, D.O. 1976. Some effects of time, temperature of treatment and fumigant concentration on the fungicidal properties of methyl bromide. *Annals of Applied Biology* 82(2), 279–290.
- Graver, J.v.S. 2004. Guide to Fumigation Under Gas-Proof Sheets. (Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Key Chemical & Equipment Co. 2022. Fumiscope Version 5.1 Manual. Key Chemical & Equipment Co. Available at: <http://www.fumiscope.com/pdf/51englishlanguagefumiscopemanual.pdf>. Accessed on 25 February 2022.
- Mühle, J., Huang, J., Weiss, R.F., Prinn, R.G., Miller, B.R., Salameh, P.K., Harth, C.M., Fraser, P.J., Porter, L.W., Grealley, B.R., O'Doherty, S., Simmonds, P.G., Krummel, P.B., Steele, L.P. 2009. Sulfuryl fluoride in the global atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, D05306.
- Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C.M., Zare, D. 2024. Research and technologies to reduce grain postharvest losses: a review. *Foods* 13(12), 1875.
- Nayak, M.K., Holloway, J.C., Emery, R.N., Pavic, H., Bartlett, J., Collins, P.J. 2013. Strong resistance to phosphine in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae): its characterisation, a rapid assay for diagnosis and its distribution in Australia. *Pest Management Science* 69, 48–53.
- NIOSH. 2014. Sulfuryl fluoride: Immediately dangerous to life or health concentrations (IDLH). The National Institute for Occupational Safety and Health. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/2699798.html>. Accessed on 24 February 2026.
- Pengkum, K., Uraichuen, J., Suthisut, D. 2018. The Proper Phosphine Fumigation to Control Flat Grain Beetle Resistance Strains. (Bangkok, Thailand: Postharvest and Processing Research and Development Division, Department of Agriculture. (in Thai)
- Regulation and Assurance Branch. 2018. Methyl bromide fumigation enclosure gas monitoring. Ministry for Primary Industries, New Zealand Government. Available at: <https://www.mpi.govt.nz/dmsdocument/29825/sitemap>. Accessed on 29 April 2026.
- Reichmuth, C.H., Klementz, D., Rassmann, W., Stenglein, M., Münzel, M. 2004. Phosphine resistance in the stored product insect pests the rusty grain beetle *Cryptolestes ferrugineus* and the granary weevil *Sitophilus granarius*. In: Donahaye, E.J., Navarro, S., Bell, C., Jayas, D., Noyes, R., Phillips, T.W. (Eds). *Proceedings of the International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*, 613. FTIC Ltd. Publishing, Israel, Gold-Coast, Australia.
- Riken Keiki Co, L. 2021. Optical Interferometric Gas Monitor: Model FI-8000. Riken Keiki Co., Ltd. Available at: https://product.rikenkeiki.co.jp/assets/img/products/62/cat/PC3E-0421-250400S_FI-8000.pdf. Accessed on 30 January 2026.
- Schneider, B., Voglewede, C., Shodrock, D. 2003. Developing precision fumigation plans using the ProFume Fumiguide. In. 2003 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, San Diego, CA.
- SGT Service. 2026. Fumiscope. SGT Service (Thailand) Co., Ltd. Available at: <https://www.sgt-service.co.th/products/0-5-FUMISCOPE>. Accessed on 20 January 2026.
- Spectros Instruments. 2022. PM400 phosphine monitor. Spectros Instruments Inc. Available at: https://www.spectrosinstruments.com/prod_pm400.html. Accessed on 14 February 2022.

- Spectros Instruments. 2026. PM100 series: phosphine monitor. Spectros Instruments Inc. Available at: <https://www.spectrosinstruments.com/pm100>. Accessed on 30 April 2026.
- The Canary Company. 2022. Silo-Chek. The Canary Company Pty. Ltd. Available at: <http://www.canaryco.com.au/silo-chek/>. Accessed on 14 February 2023.
- UNEP. 2026. The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme. Available at: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>. Accessed on 7 November 2022.
- Uniphos Envirotronic. 2022. FumiTrack Multiport with Expansion Module. Uniphos Envirotronic Pvt. Ltd. Available at: <https://uniphos-envirotronic.com/fumigation-monitoring-equipment/phosphine/multi-port-with-expansion-module/>. Accessed on 14 February 2022.
- Uniphos Envirotronic. 2026. Fumispec Lo. Uniphos Envirotronic Pvt. Ltd. Available at: <https://uniphos-envirotronic.com/fumigation-monitoring-equipment/sulphuryl-fluoride/fumispec-lo/>. Accessed on 25 February 2026.
- Wikimedia Commons contributors. 2020. File:Thermal Conductivity Detector nl.svg. Wikimedia Commons. Available at: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Thermal_Conductivity_Detector_nl.svg&oldid=498660584. Accessed on 20 February 2026.
- Williams, R.E., Prabhakaran, S., Schneider, B.M. 2000. Monitoring for precision fumigant application in food-processing plants. In. 2000 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 6-9 November 2000, Orlando, FL.
- Wuensch Sales. 2026. Draeger Accuro pump. Wuensch Sales Company. Available at: <https://www.wuenschsales.com/product/draeger-accuro-pump/?srsltid=AfmBOorYz4CwaR1mkZoLv2dl5>
- [tBwfWkp28lAtWEVm62CH5JjyYigye5X](#). Accessed on 20 February 2026.