

การพัฒนาหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียน

การบำบัดสำหรับกระบวนการรมผลลำไยสด

Development of SO₂ Wet Scrubber with Recirculation System

for Fumigation of Fresh Longan

สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ*, จักรพงษ์ พิมพ์พิมล จาตุพงษ์ วาฤทธิ์ และชนวัฒน์ นิตะนวิจิตร

Somkiat Jaturonglumert*, Jakapong Phimpimol, Jatuphong Varith and Chanawat Nitatwichit

Abstract

The objective of this research was to develop a standard SO₂ wet scrubber with recirculation system for fumigation of fresh longan and promote the process of SO₂ fumigation with forced-air for industry. The SO₂ wet scrubber was designed for appropriate and safety process. The study shows that the time of gas suction was 1 minute altogether and the time of recirculated gas were 2 minutes on gas flow rate of 272 cubic feet per minute over working periods. The recirculation of scrubbing gas was found to increase scrubbing efficiency by lowering the final SO₂ concentration below the environmental standard at 60 ppm. The wet scrubber with recirculated process gave increasing percentage of the efficiency within 10 minutes more than conventional process at the level of SO₂ concentration of 5,000, 10,000 and 15,000 ppm from 65.01, 76.58 and 59.60%, respectively to 96.52, 98.96 and 87.20%, respectively. However the recirculated process took longer time than conventional preservation. This output of this research can be used as a prototype for wet scrubber of SO₂ with recirculation, which high efficiency and environment friendly for SO₂ fumigation processors and industry.

Keywords : SO₂ wet scrubber, Fumigation, Fresh Longan

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพัฒนาหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาตรฐานแบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัดที่สามารถนำมาใช้กับห้องรมผลลำไยสดแบบบังคับอากาศในเชิงอุตสาหกรรมได้ หอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกออกแบบเพื่อศึกษาการทำงานของระบบแบบหมุนเวียนการบำบัดที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยสูง ผลการศึกษาพบว่าระบบแบบหมุนเวียนการบำบัดควรใช้เวลาในดูดก๊าซเข้าหอบำบัดเท่ากับ 1 นาที ร่วมกับเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด 2 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีตลอดช่วงรอบการทำงาน ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยการลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกได้ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 60 ส่วนต่อล้านส่วน โดยในช่วงของการบำบัด 10 นาทีแรก พบว่าหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ใช้ระดับความเข้มข้นสุดท้ายภายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ส่วนต่อล้านส่วนตามลำดับ สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดจากระบบเดิมที่ 65.01 76.58 และ 59.60% ตามลำดับ สูงขึ้นเป็น 96.52 98.96 และ 87.20% ตามลำดับอย่างไรก็ตามหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดยังคงใช้เวลาในการบำบัดนานกว่าระบบเดิม ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาตรฐานแบบเปียกที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ปฏิบัติงานและสถานประกอบการห้องรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด ในเชิงอุตสาหกรรม

คำนำ

ลำไย(*Dimocarpus Longan* Lour.) เป็นผลไม้ที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถส่งออกและนำรายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท ในเขตภาคเหนือของประเทศไทยมีเกษตรกรผู้ปลูกลำไยมากกว่า 3 แสนราย โดยมีพื้นที่ปลูกประมาณ 9 แสนไร่ ซึ่งสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรรายงานว่า ในปี 2555 และ 2556 ที่ผ่านมา มีปริมาณการส่งออกผลลำไยจำนวน 596,418 และ 565,960 ตัน คิดเป็นมูลค่า 12,843.3 และ 13,172.7 ล้านบาท ตามลำดับโดยมีสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นตลาดส่งออกที่สำคัญ (Office of agricultural economics, 2013) เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับผลลำไยสดคือ การรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันปัญหาการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลได้ (Jiang *et al.*, 2002, Pimphimon *et al.*, 2007) แต่ในปัจจุบันการรมผลลำไยสดด้วย SO_2 ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการมี SO_2 เหลือทิ้งจากกระบวนการรม SO_2 ซึ่ง

ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในช่วง 10 นาทีแรกของการบำบัดจะมีการปล่อยก๊าซ SO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่า 1,000 ส่วนต่อล้านส่วน ซึ่งทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดก๊าซ SO_2 ออกจากห้องรมอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (Good manufacturing practices for sulphur dioxide fumigation on fresh longans, 2010)

Pimphimon *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาหอบำบัดก๊าซ SO_2 แบบเปียกร่วมกับระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับของห้องรม SO_2 พบว่า ตัวแปรสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของหอบำบัด SO_2 คืออัตราการไหลของสารละลายดูดซับ (Slurry flow) และอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow) ซึ่งจะต้องปรับให้เหมาะสมกับระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังการรมซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานกันอยู่ 2 ระบบคือระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้อง (Circulating-air) หรือระบบแบบเดิม (Conventional) ตามที่ Tongdee (1992) แนะนำไว้คือ 12,000-15,000 ppm และระบบบังคับอากาศ (Forced-air) ตามที่ Pimphimon *et al.* (2010) แนะนำไว้คือ 4,000-5,000 ppm นอกจากนี้ Jaturonglumlert *et al.* (2013)

ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของหอบำบัดก๊าซ SO_2 และแนะนำให้ใช้อัตราไหลของสารละลายดูดซับเท่ากับ 70 ลิตร ต่อ นาที (lpm) และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาที (cfm) อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวก็ยังคงปล่อยก๊าซ SO_2 สู่อากาศในระยะเวลา 10 นาทีแรกสูงอยู่ ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการพัฒนาหอบำบัด SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัด เพื่อลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 ลงให้ต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนดคือต่ำกว่า 60 ส่วนต่อล้านส่วน (Proclamation of ministry of industry, 2006) ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม และศึกษาความเหมาะสมสำหรับใช้กับห้องรมแบบบังคับอากาศในเชิงการค้า

อุปกรณ์และวิธีการ

ชุดระบบห้องรม SO_2 กับผลล่ำไยสด

ในงานวิจัยนี้จะใช้ห้องรม SO_2 กับผลล่ำไยสดที่ออกแบบและสร้างไว้ตาม Pimphimon *et al.* (2011) ซึ่งมีชุดโครงสร้างระบบบังคับอากาศในแนวตั้งด้วยการหมุนเวียนอากาศภายใน ห้องรม (Fumigation room) ถูกออกแบบและสร้างขึ้นให้มีขนาด 3x4.2x3 เมตร หรือเท่ากับ 37.80 ลูกบาศก์เมตร สามารถรมผลล่ำไยสดได้ครั้งละประมาณ 4 ตัน โครงสร้างของห้องทำด้วยเหล็กทาสีกันสนิม มีล้อสำหรับเคลื่อนย้ายได้ ส่วนพื้นห้องเป็นสแตนเลสชนิดเรียบ ผ่นห้องเป็นแผ่นโลหะเคลือบสังกะสี และมีฉนวนเป็นโฟลียูรีเทน ประตูเป็นแบบบานเดี่ยว ภายในห้องมีระบบระบายน้ำพร้อมระบบแสงสว่าง และมีระบบพัดลมดูดอากาศพร้อมตู้ควบคุมเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งภายในห้องรม ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยในระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งที่ออกแบบไว้สามารถรมผลล่ำไยสดได้ 3 ชุดๆ ละ 2 แท่นรอง (Pallet) โดยแต่ละแท่นรองจะบรรจุผลล่ำไยสดได้ 660 กิโลกรัม (60 ตะกร้า x 11 กิโลกรัม) โดยใช้การจัดเรียงแบบแนวตั้งซึ่งมีแถวละ 6 ตะกร้าจำนวน 10 ชั้น ส่วนตะกร้าบรรจุผลล่ำไยเป็นแบบที่ผู้ประกอบการใช้เชิงการค้าขนาด 35x55x15 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดซึ่งสามารถบรรจุ

ผลล่ำไยได้ประมาณ 11 กิโลกรัม ในแต่ละชุดด้านบนจะมีพัดลมดูดอากาศพร้อมฝาชีครอบ (Hood) ติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องจำนวน 1 ตัว ขนาด 2 แรงม้า ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลได้โดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับรอบมอเตอร์ (Inverter) ให้มีความถี่กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป เพื่อให้สามารถดูดอากาศและก๊าซ SO_2 จากด้านล่างของห้องผ่านตะกร้าบรรจุผลล่ำไยไปยังด้านบนของห้องระบบจ่ายก๊าซ SO_2 จากถัง (SO_2 Tank) และหอบำบัด SO_2 แบบเปียก(The SO_2 wet scrubber) ที่มีระบบหมุนเวียนการบำบัด (Recirculation system)

ชุดระบบหอบำบัด SO_2

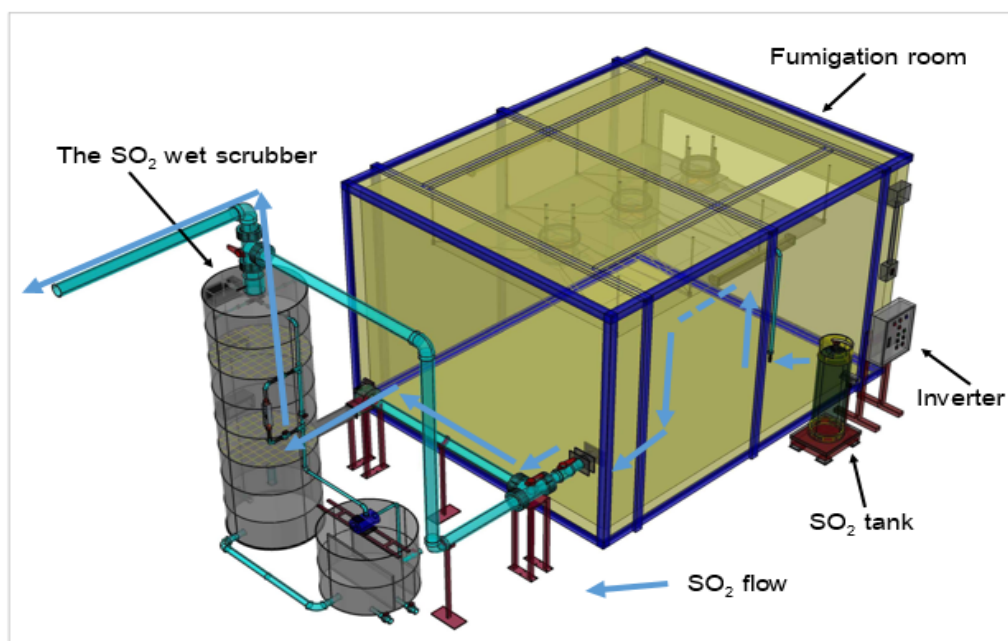
ในงานวิจัยนี้จะสร้างหอบำบัด SO_2 แบบเปียกซึ่งได้มาจากผลการออกแบบ และคำนวณทางวิศวกรรม (Bandyopadhyay and Biswas, 2007, Brogren and Karlsson, 1997, Dou *et al.*, 2009, Jaturonglumliert *et al.*, 2013) ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักของการก่อสร้างคือบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวน 8 ท่อน ชั้นบรรจุตัวกลาง (Packing media) ซึ่งมีลักษณะคล้ายตัวกรองในตู้ปลา พัดลมดูดอากาศ (Blower) ขนาด 2 แรงม้า เครื่องสูบน้ำ (Pump) ขนาด 1 แรงม้า หัวฉีดน้ำพลาสติก (Spray nozzle) จำนวน 4 หัว กระจายทั่วหน้าตัดบ่อซีเมนต์ ถึงส่วนล่างใช้เกิดปฏิกิริยา (Reaction tank) เพื่อทำให้เกิดตะกอนเป็นยิบซัม ถึงผสมด้านนอกซึ่งเป็นส่วนที่ใช้เตรียมผสมน้ำปูนใส (Calcium hydroxide) ด้วยการปรับระดับน้ำกับถังส่วนล่างและเร่งการเกิดออกซิเดชัน (Forced oxidation) ด้วยการเติมอากาศจากเครื่องเป่าลม (Air pump) ถังน้ำล้นและถังผสมน้ำโซดาไฟ (Sodium hydroxide) ใช้เป็นตัวจับกับก๊าซ SO_2 ในระบบ Scrubbing ซึ่งจะไม่เกิดตะกอนในการดูดซับ ถังน้ำล้นและถังเติมน้ำเข้าระบบซึ่งจะต่อกับเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำปูนใสแบบลูกลอย (Rotameter) ที่ตำแหน่งทางเข้าและออก(Inlet and outlet) ของหอบำบัด SO_2 มีช่องใส่เครื่องมือตรวจวัดปริมาณ SO_2 ซึ่งใช้เครื่องมือก๊าซไอเสีย (Combustion gas analyzer, TESTO รุ่น 340, Germany) โดยมีช่วงการเก็บข้อมูลที่ 0-20,000 ppm และค่าความ

คลาดเคลื่อน ± 10 ppm ซึ่งสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพ หอบำบัดที่เวลาใด ๆ (η_t) ได้จากสมการ

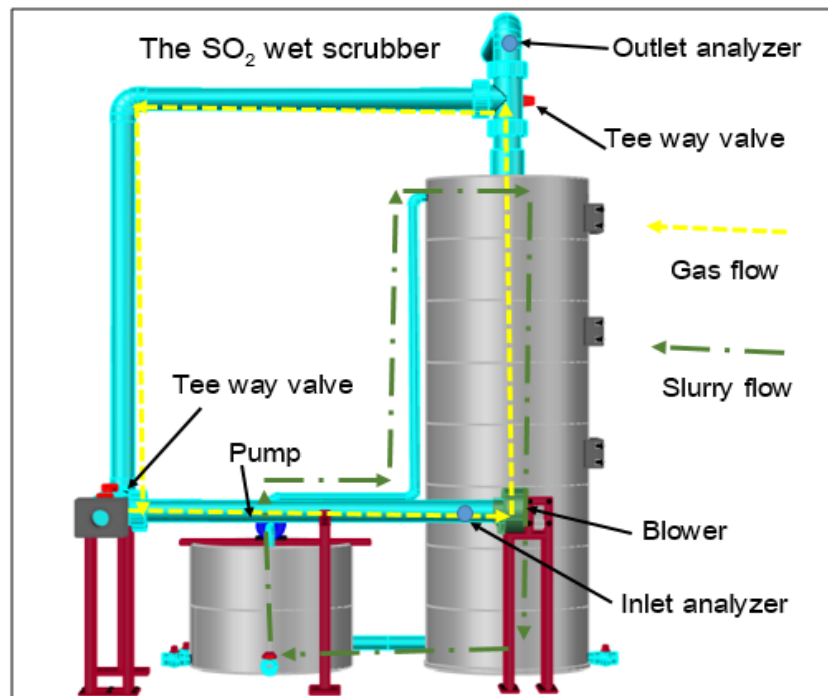
$$\eta_t = 100 \times (C_{i,t} - C_{o,t}) / C_{i,t}$$

เมื่อ $C_{i,t}$ คือค่าความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 (SO_2 concentration) ที่ตำแหน่งทางเข้า และ $C_{o,t}$ คือค่าความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกและสามารถ

คำนวณค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัด (Average efficiency, η_t) ได้จากการเฉลี่ยค่าประสิทธิภาพหอบำบัดที่เวลาใด ๆ และตรวจวัดเวลาที่ใช้ในการบำบัด (Scrubbing time, t_s) จากการจับเวลานาฬิกาในหน่วยนาที่ และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple-range test (DMRT)



ภาพที่ 1 ระบบรมไล่ไล่สดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์

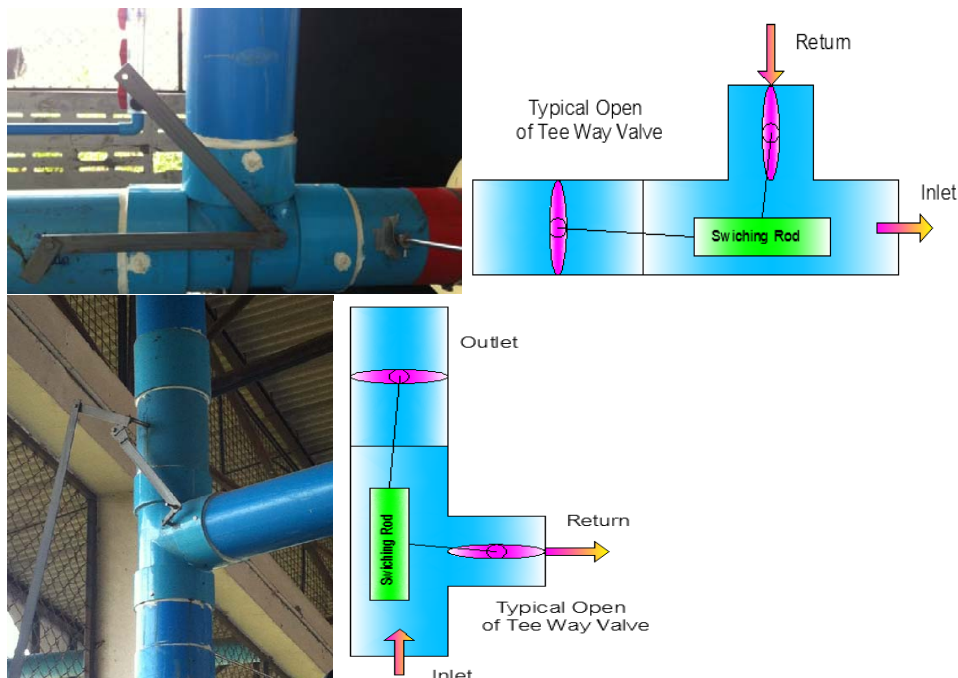


ภาพที่ 2 ระบบแบบหมุนเวียนการบำบัด

ระบบแบบหมุนเวียนการบำบัด (Recirculation system)

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้พัฒนาระบบหมุนเวียนการบำบัดโดยติดตั้งวาล์วสามทาง (Tee way valve) ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของหอบำบัด SO_2 ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งมีการทำงานโดยใช้กลไกการโยกกันเปิด-ปิดวาล์วสามทางเพื่อสลับทิศทางการไหล โดยในภาพแสดงการทำงานแบบปกติเปิด (Typical open) ของระบบหมุนเวียนการบำบัด สำหรับในกระบวนการหลังจากสิ้นสุดการรมโดยปกติ จะทำการบำบัดก๊าซ SO_2 โดยการดูดก๊าซ SO_2 ออกจากห้องรมผ่านหอบำบัด SO_2 แบบเปียกก๊าซ SO_2 ซึ่งเป็นกรดเข้มข้นจะไหลสวนทางขึ้นไปปะทะกับน้ำปูนใสซึ่งเป็นด่างเข้มข้นที่ไหลมาจากหัวฉีดน้ำด้านบนแล้วไหลผ่านลงมายังชั้นบรรจุตัวกลางเพื่อชะลอการไหล และเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยากัน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะถ้าปริมาณ

SO_2 มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ ที่ตำแหน่งทางออกจึงมีปริมาณ SO_2 ตกค้างเหลือหลุดออกไป ดังนั้นการออกแบบระบบหมุนเวียนการบำบัด จึงเป็นทางออกที่ดีในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยใช้หลักการในการบังคับให้ปริมาณ SO_2 ตกค้างหมุนเวียนกลับบำบัดซ้ำ จนกว่าจะมีระดับความเข้มข้นต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนด ก่อนปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม จากเทคนิคดังกล่าวจะพบว่าตัวแปรในการศึกษาคือเวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัด (The time of gas suction, S) และเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด (The time of recirculation, R) ในหน่วยนาที ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow rate, G) ในหน่วย cfm และระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 (The level of SO_2 concentration) ที่จะทำการบำบัดในหน่วย ppm ซึ่งจะต้องมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด



ภาพที่ 3 วาล์วสามทางที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของหอบำบัด

ผลและวิจารณ์

การศึกษาผลของเวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดและเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด

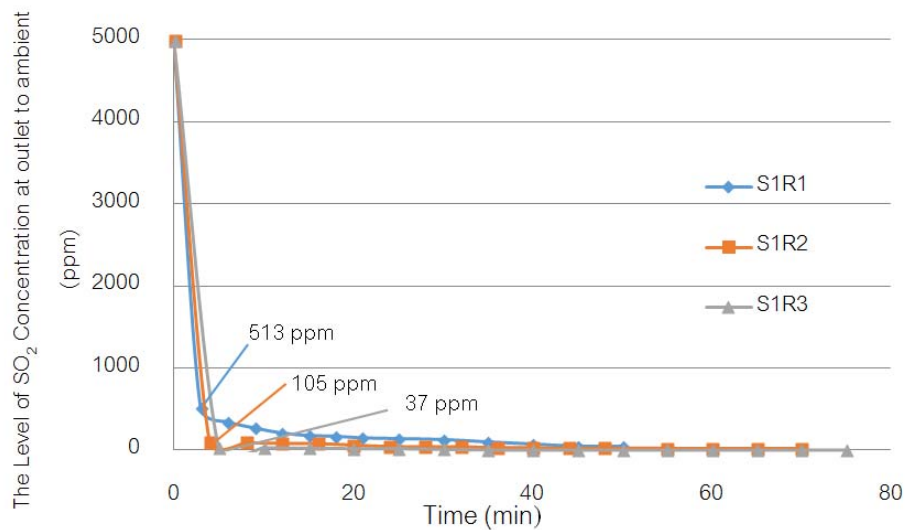
จากการพัฒนาหอบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนการบำบัดซึ่งต้องทำการหาสภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของระบบในแบบต่าง ๆ โดยเริ่มจากการคำนวณเวลาที่ใช้ในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดตามอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมเท่ากับ 165 cfm (Jaturonglumlert et al., 2013) ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดจนเต็มปริมาตรของหอบำบัดและท่อนกลับประมาณ 1-2 นาที ส่วนเวลาในการหมุนเวียนการบำบัดจะต้องทำการเก็บข้อมูลโดยการตรวจวัดค่า SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกจนกว่าจะมีระดับความเข้มข้นต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนด ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นการไ้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรม

5,000 ppm ที่อัตราการไหลของก๊าซที่ 165 cfm เพื่อตรวจวัดค่า SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรก พร้อมคำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัด และเวลาที่ใช้ในการบำบัด ซึ่งผลที่ได้ พบว่า เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดมีความแตกต่างกันของประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดที่ค่าเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด 2 และ 3 นาที แต่ที่เวลาในการหมุนเวียนการบำบัด 3 นาทีจะทำให้ค่า SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกมีค่าต่ำกว่า 60 ppm และเลือกที่มีการใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรม 5,000 ppm ที่อัตราการไหลของก๊าซที่ 165 cfm ควรใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัด 1 นาที และเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด 3 นาที หรือ S1R3 ดังแสดงผลเปรียบเทียบในภาพที่ 4

ตารางที่ 1 ผลของระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกในช่วงเวลา 10 นาทีแรก, ประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัด และเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรม 5,000 ppm และอัตราการไหลของก๊าซที่ 165 cfm โดยใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดและเวลาในการหมุนเวียนการบำบัดเปลี่ยนแปลง

Time of gas suction, S		Time of gas recirculation, R		
		R = 1 min	R = 2 min	R = 3 min
S = 1 min	SO_2 Concentration (ppm)	513	105	37
	Average efficiency (%)	75.9±5.26 ^a	89.55±4.70 ^b	89.59±4.87 ^b
	Scrubbing time (min)	50	70	75
S = 2 min	SO_2 Concentration (ppm)	478	295	30
	Average efficiency (%)	75.33±5.23 ^a	86.17±5.05 ^a	86.33±5.05 ^a
	Scrubbing time (min)	55	75	80

^{a,b} = means within the same row with different superscripts differ significantly ($p < 0.05$) by Duncan's multiple-range test (DMRT)



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกตอนเวลา 10 นาทีตลอดช่วงระยะเวลาการบำบัด เมื่อใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดและเวลาในการหมุนเวียนการบำบัดเปลี่ยนแปลง (S1R1 คือเวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนเวียน 1 นาที S1R2 คือเวลาในการดูด 1 นาทีและเวลาในการหมุนเวียน 2 นาที และ S1R3 คือเวลาในการดูด 1 นาทีและเวลาในการหมุนเวียน 3 นาที)

เมื่อทำการศึกษาระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมเพิ่มขึ้นจาก 5,000 เป็น 10,000 และ 15,000 ppm ที่อัตราการไหลของก๊าซที่ 165 cfm คงที่ จะพบว่าควรใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดเท่าเดิม แต่เวลาในการหมุนเวียนการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 3 4 และ 5 นาที ตามลำดับ จึงจะทำให้ค่า SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกมีค่าต่ำกว่า 60 ppm อย่างไรก็ตามค่าของเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะยิ่งมากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ประกอบการไม่ต้องการ เนื่องจากเสียเวลาในการรอทำให้ไม่สามารถใช้ห้องรมต่อเนื่องได้ (ถ้าหอบำบัดยังไม่เสร็จก็ยังไม่สามารถเปิดห้องรมเอาผลลำไยสดออกมาได้) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาที่ใช้ในการบำบัดลง จึงควรลองศึกษาใช้อัตราไหลของก๊าซที่สูงขึ้น เพื่อให้ระบบหมุนเวียนทำงานได้เร็วขึ้นดังแสดงผลในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัด และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซ และระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมที่สูงขึ้น โดยใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดและเวลาในการหมุนเวียนการบำบัด ที่ทำให้ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกยังคงมีค่าต่ำกว่า 60 ppm ผลการศึกษพบว่าระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมที่ 5,000 10,000 และ 15,000 ppm และอัตราการไหลของก๊าซที่ 272 cfm คงที่ควรใช้เวลาในการหมุนเวียนการบำบัด

เป็น 2 3 และ 4 นาที ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดมีแนวโน้มดีขึ้น ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมเพิ่มเป็น 15,000 ppm ที่มีค่าลดลง โดยมีค่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดลดลงทุกระดับความเข้มข้น นอกจากนี้ผลการศึกษาที่ได้ยังพบว่า ค่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดสามารถลดลงได้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจาก 165 เป็น 272 cfm

การประเมินประสิทธิภาพของระบบแบบหมุนเวียนการบำบัด

จากผลการศึกษาหอบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนการบำบัดที่ผ่านมาพบว่าสามารถช่วยลดค่า SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกได้ผลดีมากเมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ไม่มีการหมุนเวียนการบำบัด ดังแสดงผลในตารางที่ 3 ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่อใช้ระบบแบบไม่หมุนเวียนการบำบัดหรือแบบเดิม (Conventional) กับแบบหมุนเวียนการบำบัด (Recirculation) ซึ่งเลือกใช้อัตราการไหลของก๊าซคงที่เท่ากับ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ผลที่ได้พบว่าทุกระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรวมมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดดีขึ้น 27.16-34.12% ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการบำบัดก็มีค่าเพิ่มขึ้น 15-25 นาที

ตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซและระดับความเข้มข้นของ SO_2 ก่อนเริ่มต้นการบำบัดเปลี่ยนแปลง

Gas flow rate (cfm)		The level of SO_2 concentration		
		5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
165	Average efficiency (%)	89.59	84.58	87.04
	Scrubbing time (min)	75	80	85
218	Average efficiency (%)	89.50	89.74	77.13
	Scrubbing time (min)	70	75	75
272	Average efficiency (%)	90.27	85.27	80.19
	Scrubbing time (min)	60	70	70

ตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัดระหว่างแบบเดิมและแบบหมุนเวียนการบำบัด เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซคงที่เท่ากับ 272 cfm โดยระดับความเข้มข้นของ SO₂ ก่อนเริ่มต้นการบำบัดเปลี่ยนแปลง

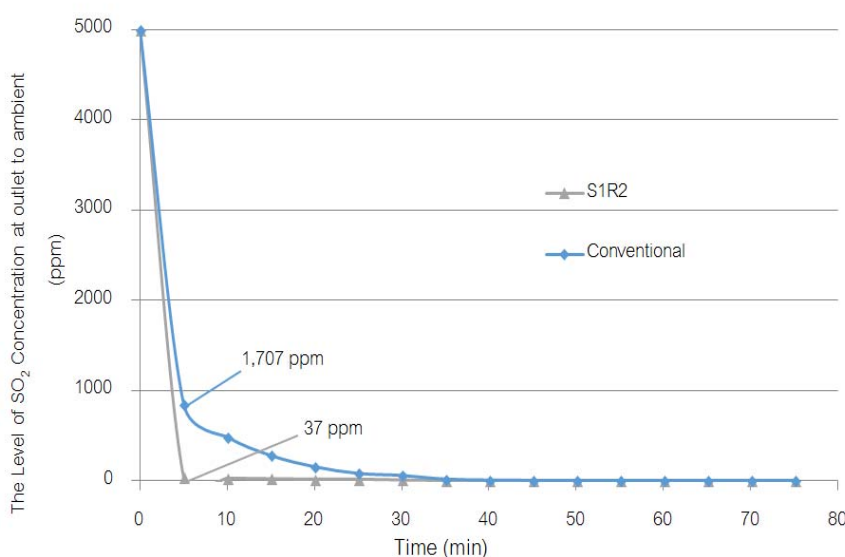
Type of System		The Level of SO ₂ Concentration		
		5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
Non-recirculation (Conventional)	Average efficiency (%)	63.11	51.15	50.93
	Scrubbing time (min)	40	45	55
Recirculation (Developed)	Average efficiency (%)	90.27	85.27	80.19
	Scrubbing time (min)	60	70	70
Increasing efficiency (%)		27.16	34.12	29.26
Increasing time (min)		20	25	15

ตารางที่ 4 ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดในช่วงเวลา 10 นาทีแรก ที่ใช้ในการบำบัดระหว่างแบบเดิมและแบบหมุนเวียนการบำบัด เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซคงที่เท่ากับ 272 cfm โดยระดับความเข้มข้นของ SO₂ ก่อนเริ่มต้นการบำบัดเปลี่ยนแปลง

Type of System		The Level of SO ₂ Concentration within 10 min		
		5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
Non-recirculation (Conventional)	Average efficiency (%)	65.01	76.58	59.60
Recirculation (Developed)	Average efficiency (%)	96.52	98.96	87.20
Increasing efficiency (%)		31.51	22.38	27.60

สำหรับในตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่ช่วงเวลาการบำบัด 10 นาทีแรกของแบบเดิมกับแบบหมุนเวียนการบำบัด เนื่องจากในทางปฏิบัติผู้ประกอบการห้องรม SO₂ กับผลล้าไยสโตไม่สามารถควบคุมระดับของค่า SO₂ ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกได้ เพราะใช้ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO₂ หลังการรมที่สูงถึง 15,000 ถึง 20,000 ppm (ระบบเผาผงกำมะถัน) ผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบให้เห็นว่าที่ทุก ๆ ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO₂ หลังการรมจะมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดสูงขึ้น โดยที่ระดับความ

เข้มข้นของก๊าซ SO₂ หลังการรมมีค่า 5,000 10,000 และ 15,000 ppm จะสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดแบบเดิมจาก 65.01 76.58 และ 59.60% ตามลำดับ เป็นประสิทธิภาพหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ 96.52 98.96 และ 87.20% ตามลำดับ ซึ่งคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นได้เท่ากับ 31.51 22.38 และ 27.60% ตามลำดับ โดยมีค่า SO₂ ที่ตำแหน่งทางออกตั้งแต่แรกต่ำกว่า 60 ppm ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO₂ หลังการรมมีค่า 15,000 ppm จะมีค่าสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ตำแหน่งทางออกในช่วงเวลา 10 นาทีแรกที่ใช้ในการบำบัดระหว่างแบบเดิมและแบบหมุนเวียนการบำบัด เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของ SO_2 ก่อนเริ่มต้นการบำบัดเท่ากับ 5,000 ppm (S1R2 คือเวลาในการดูด 1 นาทีและเวลาในการหมุนเวียน 2 นาทีของระบบหมุนเวียนการบำบัด (Recirculation) และ Conventional คือแบบเดิม)

ส่วนในภาพที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบของระบบแบบเดิมกับแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 หลังการรมมีค่า 5,000 ppm ซึ่งจะพบว่าหอบำบัด SO_2 แบบหมุนเวียนการบำบัดสามารถช่วยลดการปล่อยมลพิษทางสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดจากกระบวนการรม SO_2 กับผลล้าไยสดได้ตั้งแต่แรกช่วงแรกของการบำบัด จาก 1,707 ppm เป็น 37 ppm ซึ่งผลที่ได้ตามมามีอีกประการหนึ่งก็คือ สามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเข้าทำการขนย้ายตะกร้าบรรจุล้าไยสดในห้องรม SO_2 ได้อย่างปลอดภัย ซึ่งปัญหาสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่มักถูกละเลยจากผู้ประกอบห้องรม SO_2 กับผลล้าไยสด

สรุป

การพัฒนาหอบำบัด SO_2 แบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยการลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ SO_2 ที่ตำแหน่ง

ทางออกได้ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 60 ppm ได้ตั้งแต่เริ่มแรกของการบำบัด โดยระบบแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ใช้ระดับความเข้มข้นสุดท้ายภายหลังการรมเป็น 5,000 ppm ซึ่งเหมาะสมกับห้องรมแบบบังคับอากาศ ควรใช้เวลาในการดูดก๊าซเข้าหอบำบัดและเวลาในการหมุนเวียนการบำบัดที่อัตราการไหลของก๊าซที่ 272 cfm เป็น 1 และ 2 นาทีตามลำดับ โดยสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของหอบำบัดในช่วงเวลา 10 นาทีแรกสูงขึ้นเป็น 96.52%

คำขอบคุณ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Bandyopadhyay, A. and M. N. Biswas. 2007. Modeling of SO₂ scrubbing in spray towers. *Science of The Environment* 383: 25-40.
- Brogren, C. and H. T. Karlsson. 1997. Modeling the absorption of SO₂ in a spray scrubber using the penetration theory. *Chemical Engineering Science* 52(18): 3085-3099.
- Dou, B., W. Pan, Q. Jin, W. Wang and Y. Li. 2009. Prediction of SO₂ removal efficiency for wet flue gas desulfurization. *Energy Conversion and Management* 50: 2547-2553.
- Good manufacturing practices for sulphur dioxide fumigation on fresh longans. 2010. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, Ministry of Agricultural and Cooperation.
- Jaturonglumlert, S., Pimphimon, J., Varith, J. and Nitatwichit, C. 2013. Full report project standard wet scrubber of SO₂ with recirculated for fumigation fresh longan. Research report, The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Jiang, Y., Z. Zhang, D.C. Joyce and S. Ketsa. 2002. Postharvest biology and handling of longan fruit (*Dimocarpus longan* Lour.). *Postharvest Biology and Technology* 26: 241-252.
- Office of agricultural economics. 2013. Export-import report. Ministry of Agricultural and Cooperation. [online] Available at: <http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result/.php>
- Pimphimon, J. Varith, J. and Jaturonglumlert, S. 2007. Quality of fresh longan with SO₂ fumigation process using a vertical forced-air technique. *Journal of Agricultural Science* 38(6): 505-516. (in Thai)
- Pimphimon, J., Varith, J., Nitatwichit, C. and Jaturonglumlert, S. 2010. Full report project fumigation of fresh longan with sulfur dioxide using a vertical forced-air technique. Research report, The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Pimphimon, C., Nitatwichit, J. Varith and Jaturonglumlert, S. 2011. Full report project Outreach and efficiency improvement of SO₂ fumigation process from direct compressed gas tank using vertical forced air system, including knowledge extension to promote the policy concept and commercial practice. Research report, The Thailand Research Fund. (in Thai)
- Proclamation of ministry of industry. Regulation of environmental emissions from Thailand industry 2006. Reapproved in October 31, 2006. (in Thai)
- Tongdee, S. 1992. Good manufacturing practices for sulphur dioxide fumigation on fresh longans. Training course in March 18, 1992. Rama Garden Hotel, Bangkok. (in Thai)