

ชื่อโครงการ การสร้างหอบำบัดก๊าซSO₂มาตรฐานแบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัดสำหรับ กระบวนการรมผลลำไยสดในเชิงการค้า

Standard Wet Scrubber of SO₂ with Recirculated for Fumigation Fresh Longan

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ต้องการวิจัย

ประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกลำไยทั้งในรูปผลลำไยสดและลำไยอบแห้งทั้งเปลือก ลำไยเป็นผลไม้ที่เน่าเสียง่าย จึงจำเป็นต้องอาศัยการปฏิบัติอย่างเหมาะสมตั้งแต่การจัดการในสวนจนถึงการเก็บเกี่ยวในสวน การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวยังต้องคำนึงถึงการเก็บรักษา การขนส่งเพื่อให้ลำไยสดและอยู่ได้นาน จึงต้องใช้วิธีการรมลำไยสดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งพบว่าการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เปลือกลำไยสามารถฆ่าเชื้อรา เชื้อจุลินทรีย์ ทั้งยังช่วยชะลอการเน่าเสียและเก็บรักษาได้นานดูน่ารับประทาน ในส่วนของกระบวนการผลิตลำไยรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของผู้ประกอบการจะต้องทำภายในห้องรมก๊าซ ปัจจุบันในการรมก๊าซของผู้ประกอบการแต่ละรายจะปฏิบัติตามความเข้าใจที่คิดขึ้นมาเอง หรือคิดดัดแปลงสถานที่และอุปกรณ์ที่มีอยู่โดยขาดความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้องเป็นผลทำให้ลำไยสดหลังจากผ่านกระบวนการแล้วไม่มีคุณภาพตามที่ต้องการทั้งในส่วนของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างที่เปลือกและเนื้อเกินตามที่มาตรฐานกำหนด และคุณภาพของสีผิวที่ผลลำไยสดไม่ได้ตามที่ตลาดต้องการ นอกจากนี้ในส่วนของห้องรมและหอบำบัดที่ไม่ได้มาตรฐานยังส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานที่เพราะจะได้รับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่รั่วไหลออกมาในขณะที่ปฏิบัติงาน

ในส่วนของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือในห้องรม ภายหลังจากการรมลำไยสดแล้ว จะต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ (สถาบันอาหาร, 2541) จากการทำวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผู้ประกอบการรายย่อยที่สร้างห้องรมพร้อมด้วยหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มักมีคุณภาพไม่ได้ตามมาตรฐาน โดยเฉพาะใน ส่วนหอบำบัดผู้ประกอบการขาดการเอาใจใส่ในการดูแลคุณภาพของอากาศก่อนปล่อยทิ้ง บางรายไม่เคยดูแลรักษาและตรวจสอบคุณภาพการทำงานของหอบำบัดเลย จนทำให้หอบำบัดและอาคารใกล้เคียงเกิดการสึกกร่อนจากผลของกรดซัลฟูริกที่มาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อันเนื่องมาจากหอบำบัดไม่ได้มาตรฐานและไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการใช้งานนั่นเอง ส่วนผู้ประกอบการรายใหญ่มีห้องรมจำนวนมากโดยสร้างตามแบบที่กำหนดเอาไว้ แต่ส่วนหอบำบัดมีเพียงหอดเดียวซึ่งต้องทำงานหนักในช่วงเวลาฤดูการส่งออกลำไย ซึ่งส่วนใหญ่ผู้ประกอบการรายใหญ่มักให้หอบำบัดทำงานได้เร็วเพื่อทันสำหรับห้องรมถัดไปซึ่งกำลังปฏิบัติงานอยู่ ดังนั้นจึงปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากห้องรมเข้าสู่หอบำบัด โดยใช้เวลาน้อยเกินกำลังที่หอบำบัดทำได้ ทำให้อากาศที่ปล่อยสู่สภาพแวดล้อมมีการปนเปื้อนของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงต้นของเวลาบำบัด (ประมาณ 10 นาทีแรก) จะมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนเปื้อนสูงกว่า 2,000 ppm ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวยังไม่สามารถทำการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนเปื้อน

ในช่วงเวลาเริ่มต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทางทีมผู้วิจัยจึงคาดว่า การใช้เทคนิคการหมุนเวียนการบำบัดมาใช้ร่วมกับหอบำบัดแบบเปียกน่าจะทำให้เกิดประสิทธิภาพดีขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวพบว่าผู้ประกอบการขาดทั้งเทคโนโลยีที่เหมาะสมและการปฏิบัติที่ถูกต้องในการจัดการทำงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบและสร้างหอบำบัด SO_2 ที่มีมาตรฐานด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัดเพื่อลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนเปื้อนให้เหลือน้อยที่สุดก่อนปล่อยสู่สภาพแวดล้อม โดยการออกแบบและสร้างหอบำบัด SO_2 มาตรฐานแบบเปียกตามหลักการทางวิศวกรรม พร้อมทั้งนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปเผยแพร่ให้ผู้ประกอบการใช้อย่างถูกต้องโดยมีการดูแลตรวจสอบคุณภาพอากาศก่อนปล่อยสู่สภาพแวดล้อมรวมทั้งเอาใจใส่ในการดูแลรักษาคุณภาพของหอบำบัดอย่างสม่ำเสมอ

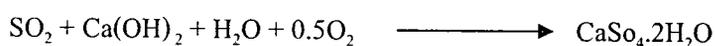
วัตถุประสงค์

เพื่อต้องการออกแบบและสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มาตรฐานแบบเปียกเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสดซึ่งเหมาะสมและสามารถนำมาใช้กับกระบวนการรมผลลำไยสดในเชิงอุตสาหกรรมขนาดกลางหรือเชิงการค้าได้

การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารอันตราย ดังนั้นผู้ประกอบการที่ใช้ต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติเฉพาะตัวและความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของก๊าซที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟ แต่มีกลิ่นฉุน คุณสมบัติเฉพาะคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสหนัก 2.61 มิลลิกรัม และมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี โดยน้ำ 1 หน่วยนั้นสามารถละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ 45 หน่วย การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดพลังงานขึ้นในการดำรงชีวิตของมนุษย์และการอุตสาหกรรมนั้นจะทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรมนั้นก็เป็นที่แหล่งกำเนิดมลพิษ (จักรพงษ์, 2550) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถกัดกร่อนและเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ โดยปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียง 4 ส่วนในล้านส่วนสามารถทำให้เกิดกลิ่นได้ ถ้ามีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 20 ส่วนในล้านส่วนทำให้เกิดการระคายเคือง หรือ ถ้าบรรยากาศมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน และได้รับเกินกว่า 1 นาที ทำให้ตา เยื่อจมูก คอหอย เป็นอันตรายได้ และถ้าบรรยากาศมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วนจะเป็นอันตรายต่อคนได้ถ้าสูดดมนานกว่า 30-60 นาที ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกินกว่า 1,000 - 2,000 ส่วนในล้านส่วน (ร้อยละ 0.1-0.2) จะทำให้ตายได้ (สดศรี, 2535) หลังจากการรมก๊าซซึ่งระยะเวลาการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณ SO₂ โดยทั่วไปแล้วใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที หลังจากกระบวนการรม SO₂ พบว่าจะมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลืออยู่ในห้อง โดยมีความเข้มข้น 12,000-15,000 ส่วนในล้านส่วน (สถาบันอาหาร, 2541) ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือนี้ก่อนที่จะนำลำไยออกจากห้องเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อคนและเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

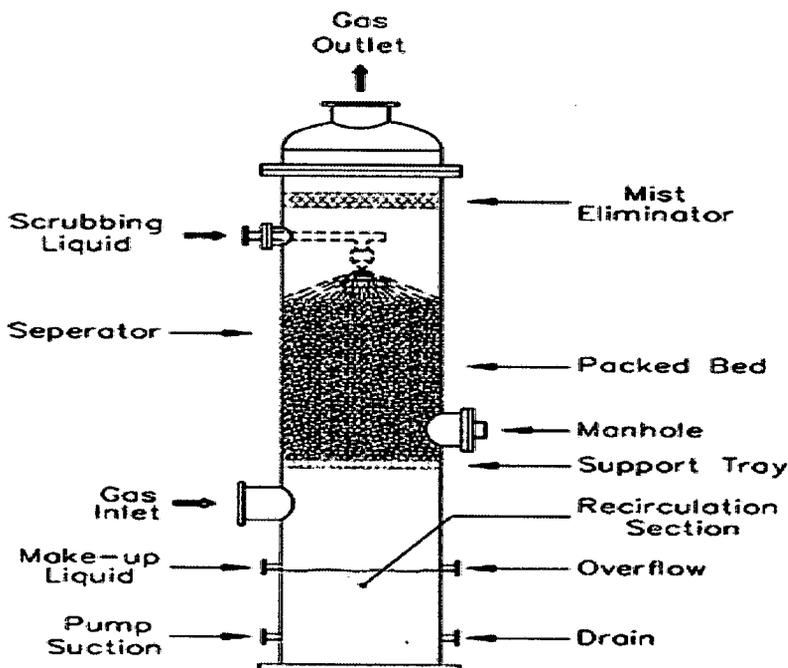
โดยที่หอที่ใช้ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น เป็นแบบเปียก (Wet scrubber) ซึ่งแบบที่นิยมกันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี โดยน้ำ 1 ลิตรนั้นจะสามารถละลายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ถึง 45 ลิตร โดยมีอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียส และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดให้สูงขึ้นโดยการใช้ปูนขาวในอัตราร้อยละ 5-15 โดยปริมาตร ละลายน้ำให้กลายเป็นน้ำปูนใส [Ca(OH)₂] ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลายเป็นยิปซัม (CaSO₄·2H₂O) ในที่สุด (สดศรี, 2535) โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการเคมี ดังนี้



ระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นจึงมีการออกแบบให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับน้ำปูนใสให้ได้มากที่สุด เพื่อให้เกิดการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากการปล่อยก๊าซทิ้ง

หอบำบัดแบบเปียกเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กำจัดสารมลพิษออกจากก๊าซเผาไหม้ มีลักษณะเป็นหอแนวตั้ง ภายในบรรจุ Packing media เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซเผาไหม้กับของเหลวบำบัดของเหลวจะถูกฉีด (Spray) เข้าไปในหอ และไปปกคลุมอยู่บนผิวของ Packing media เมื่อก๊าซเผาไหม้ไหลเข้าสู่หอทางด้านล่างในลักษณะเป็นแบบไหลสวนทางกัน (Counter current) ก๊าซเผาไหม้จะสัมผัสกับของเหลวที่ปกคลุมอยู่ตัว Packing media และเกิดการถ่ายเทสารมลพิษจากสถานะก๊าซไปยังสถานะของเหลวดังแสดงในภาพที่ 1

แพคทาวเวอร์เป็นหอดักจับก๊าซที่นิยมมากที่สุด ซึ่งพัดลมจะดึงก๊าซ SO_2 จากแหล่งกำเนิดเข้าสู่หอบำบัด (Scrubber) ซึ่งมีน้ำปูนขาวบรรจุอยู่ในส่วนของอ่างบรรจุน้ำปูนขาว (Circulation Tank) จากนั้นปั๊ม (Pump) ก็จะทำให้การสูบน้ำจากอ่างบรรจุน้ำปูนขาวขึ้นไปยังส่วนบนของหอบำบัด (Scrubber) และผ่านขึ้นไปยังหัวฉีด (Spray nozzle) ปล่อยน้ำลงมาฉีดสเปรย์เป็นละอองฝอยละอองน้ำที่ฉีดลงมาผ่านวัสดุตัวกลาง (Packing) และจะไหลในทิศทางที่สวนทางกับก๊าซ SO_2 และทำการดักจับก๊าซเสียส่วนของน้ำปูนขาวจะสัมผัสกันแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ SO_2 ก่อนที่จะมีการปล่อยออกจากหอบำบัด (Scrubber) โดยผ่านทางปล่องระบาย (Over flow) ด้านบนสุดดังแสดงในภาพที่ 4 ดังนั้นจึงต้องมีการสังเกตปริมาณและความเข้มข้นของน้ำปูนขาวอยู่เสมอซึ่งน้ำปูนขาวจะมีความเป็นเบสอยู่ที่ 9 - 11 pH โดยใช้เครื่องวัด pH meter เพื่อจะทำให้ระบบรักษาสมดุลของน้ำภายในระบบและเพื่อเจือจางน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการบำบัดก๊าซสำหรับในส่วนของการระบายน้ำเสียจะเปิดเพื่อปล่อยน้ำออกจากระบบเฉพาะในกรณีที่ทำการใช้งานเสร็จแล้ว หรือต้องการที่จะตรวจสอบแก้ไขระบบ



ภาพที่ 1 ลักษณะการทำงานของหอบำบัดก๊าซแบบแพคทาวเวอร์

ที่มา : <http://www.indiamart.com/crystalindustrialsyndicate/products.html>

สำหรับข้อดีและข้อจำกัดของการออกแบบการทำงานของระบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

แนวทางที่ 1 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในระบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบหมุนเวียนการบำบัด (ระบบเดิมที่ใช้งานกันอยู่)

ข้อดี ประกอบด้วย

- ระบบการทำงานรวดเร็วตามความต้องการของสถานประกอบการเพื่อจำหน่ายก๊าซ
- มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ เนื่องจากไม่ได้ใช้ระบบที่ซับซ้อนและสารเคมีราคาถูก

ข้อจำกัด ประกอบด้วย

- มีความเสี่ยงสูงมากในเรื่องมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะช่วงแรกของการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- ไม่เกิดความปลอดภัยในการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน
- มีปัญหาเรื่องการกำจัดน้ำเสียของระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

แนวทางที่ 2 การศึกษาการทำงานของระบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบหมุนเวียนการบำบัด (ระบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้)

ข้อดี ประกอบด้วย

- มีความปลอดภัยสูงในเรื่องมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ตลอดช่วงของการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

- ไม่มีปัญหาเรื่องการกำจัดน้ำเสียของระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- เกิดความปลอดภัยในการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน

ข้อเสีย ประกอบด้วย

- ใช้เวลาในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงกว่าระบบเดิมที่ใช้
- ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วน of ระบบหมุนเวียนการบำบัด

นอกจากนี้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ ที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 ประกาศ ณ วันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2549 โดยมีข้อกำหนดของมลพิษประเภทก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากแหล่งที่มาของสารเจือปนประเภทเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศไม่เกิน 60 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังแสดงในภาพที่ 2

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

พ.ศ. ๒๕๕๕

อาศัยอำนาจตามความในข้อ ๑๖ แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ ๒ (พ.ศ. ๒๕๓๕) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้ออกประกาศไว้ดังต่อไปนี้

หน้า ๘

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปน ในอากาศที่	
		ไม่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
๕. กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๒๕	-
๑๐. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๑๐๐	๘๐
๑๑. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๘๗๐	๖๕๐
๑๒. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
	- น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่น ๆ	- - - -	๕๕๐ ๗๐๐ ๖๐ ๖๐
	ข. การผลิตทั่วไป	๕๐๐	-

(๓) การตรวจวัดค่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือวิธี Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

ภาพที่ 2 มาตรฐานการปล่อยมลพิษในอากาศ

ข้อ ๖ การรายงานผลการตรวจวัดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ ให้รายงานผล ดังต่อไปนี้

(๑) ในกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสียสภาวะจริงในขณะตรวจวัด

(๒) ในกรณีที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง

(ก) ระบบปิดให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess Air) ร้อยละ ๕๐ หรือ มีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ร้อยละ ๗

(ข) ระบบเปิดให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ณ สภาวะจริงขณะตรวจวัด

ข้อ ๗ ประกาศฉบับนี้ใช้บังคับสำหรับประเภทโรงงานใด ๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปนในอากาศที่ไม่ได้กำหนดค่าการระบายปริมาณสารเจือปนในอากาศไว้เป็นการเฉพาะ

ทั้งนี้ ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๑ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๕

โฆสิต ปั้นเปี่ยมรัษฎ์

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ภาพที่ 2 มาตรฐานการปล่อยมลพิษในอากาศ (ต่อ)

รายละเอียดของวิธีการทดลอง ผลการทดลอง วิจารณ์ สรุป และตารางข้อมูลเป็นรายกิจกรรม

กิจกรรมที่ 1 ทำการสำรวจข้อมูลขนาดของห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามสถานประกอบการที่รมล่ายด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จากการสำรวจค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของห้องรมตามสถานประกอบการต่างๆ ในจังหวัดทางภาคเหนือ เช่นจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน และเชียงราย พบว่ามีโรงรมมากกว่า 75 โรงรม โดยส่วนใหญ่มีห้องรมหลายขนาดรวมกัน ดังแสดงในภาพที่ 3 ถึง 6 ซึ่งพบว่ามีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งจะแบ่งขนาดของห้องรมล่ายด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็น 6 ขนาด ดังแสดงในตารางที่ 1

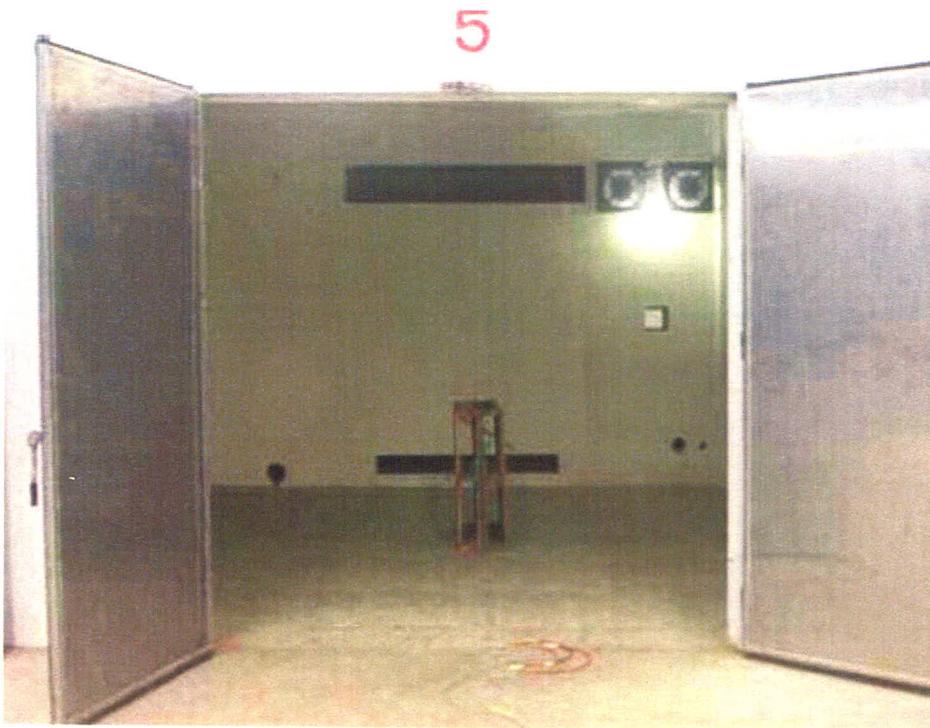
ตารางที่ 1 แสดงขนาดของห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ขนาดห้อง (เมตร) (ยาว×กว้าง×สูง)	ปริมาตรห้อง (ลูกบาศก์เมตร)	จำนวนตะกร้าสูงสุด ต่อห้องรม (ตะกร้า)	ปริมาณล่ายสูงสุดต่อ ห้องรม (กิโลกรัม)
3.6 × 2.5 × 2.4	20.7	200	2,000
4.8 × 2.4 × 2.4	27.6	300	3,000
3.6 × 3.6 × 2.4	31.1	350	3,500
4.8 × 3.6 × 2.4	41.5	400	4,000
4.8 × 4.8 × 2.4	55.3	550	5,500
5.0 × 5.0 × 2.9	72.5	720	7,200

จากข้อมูลทั้งขนาดห้องรมที่ใช้ในสถานประกอบการ โรงรม และหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าส่วนใหญ่โรงรมจะมีห้องรมหลายขนาด เพื่อใช้รมล่ายสดตามปริมาณที่มีสำหรับส่งสินค้าออกจำหน่าย โดยเมื่อหลังจากรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลล่ายสดแล้วจะทำการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยหอบำบัดแบบเปียก (Wet scrubber) ซึ่งสร้างอย่างง่ายด้วยโครงสร้างท่อซีเมนต์วางกลมต่อกันเป็นชั้นๆ ส่วนใหญ่จะมีเพียง 1 ถึง 2 หอเท่านั้นโดยต่อท่อใช้ร่วมกันทั้งหมด โดยข้อมูลการศึกษาโรงรมในจังหวัดทางภาคเหนือ ส่วนใหญ่พบว่า ร้อยละ 92 ใช้รูปแบบการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในหอบำบัดแบบเปียกด้วยสารตัวกลาง (Packing bed scrubber) และใช้สารชะล้างเป็นน้ำปูนใส ซึ่งได้มาจากการละลายปูนขาวด้วยน้ำในสัดส่วนก้ำมะถันที่เผาให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อรมผลล่ายสด ผลการประเมินเบื้องต้นพบว่าประสิทธิภาพของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้กันทั่วไปมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลากการบำบัดอยู่ในช่วงประมาณ 37.75 ถึง 79.50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3 แสดงโรงรมในจังหวัดทางภาคเหนือซึ่งมีหลายขนาด



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะภายในห้องรมแบบที่ใช้ทางการค้า



ภาพที่ 5 แสดงลักษณะห้องรมขนาดเล็ก



ภาพที่ 6 แสดงระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้องรม

1.1 ทำการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกสำหรับขนาดห้องรมแต่ละขนาด

จากข้อมูลขนาดห้องรมซึ่งมีใช้กันพบว่ามีหลายขนาดและหลายจำนวนห้อง ดังนั้นการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกจึงควรคำนวณจากขนาดห้องที่ใหญ่ที่สุดที่ใช้ ซึ่งถ้าโรงรมมีจำนวนห้องหลายห้องก็สามารถใช้หอบำบัดที่สามารถรองรับกับห้องขนาดใหญ่ที่สุดได้ ส่วนห้องที่มีขนาดเล็กลงมาก็ยังคงใช้หอบำบัดตัวเดิมได้ เพียงแต่ปรับสภาวะการใช้งานให้เหมาะสมตามเงื่อนไข โดยในลำดับถัดไปจะแสดงขั้นตอนการคำนวณหาส่วนประกอบที่สำคัญของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก ซึ่งจะใช้นาห้องใหญ่สุดตามตารางที่ 1 ดังแสดงรายการคำนวณทั้ง 13 ขั้นตอนดังนี้

(1) การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

โดยตั้งสมมุติฐานการคำนวณเริ่มต้นดังนี้

- ห้องรมลำไยขนาด	72.5	ลูกบาศก์เมตร
- ปริมาณลำไย	7,200	กิโลกรัม
- เวลาที่ใช้บำบัดก๊าซ SO ₂ ประมาณ	20 – 30	นาที
- ความดันบรรยากาศภายในห้อง	1	บรรยากาศ
- อุณหภูมิห้อง	30	องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมสูงสุด	20,000	ส่วนในล้านส่วน
- ลำไยพันธุ์อีดอขนาดผลเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	2.4	เซนติเมตร

(2) การหาปริมาณผงกำมะถันที่ใช้สำหรับการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปริมาณผงกำมะถันที่เหมาะสมกับปริมาณของผลลำไยที่ต้องการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ต้องใช้ในอัตราที่น้อยที่สุดแต่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการควบคุมโรคสูงที่สุดในผลลำไยแต่ละพันธุ์มีความสามารถในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แตกต่างกันไปซึ่ง (2542) กล่าวว่าปริมาณการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ขึ้นอยู่กับความต้องการปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ตกค้างสูงที่สุด (Maximum residue level: MRL) เท่าใด ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการยืดเวลาการเก็บรักษา และข้อกำหนดระหว่างประเทศคู่ค้า (สถาบันอาหาร, 2541) การคำนวณปริมาณผงกำมะถันที่เผาในการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$\text{น้ำหนักของก๊าซ SO}_2 \text{ (กรัม)} = M + S \quad (1)$$

$$\text{และ} \quad M = W \times A \quad (2)$$

$$S = C \times F \times D \quad (3)$$

โดยที่

M = ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ตกค้างสูงสุด (ส่วนในล้านส่วน)

S = ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือตกค้างภายในห้องหลังจากสิ้นสุดการกรรม (ส่วนในล้านส่วน)

W = น้ำหนักลำไยที่ต้องการกรรม (กิโลกรัม)

A = อัตราการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของผลลำไย (0.66 – 0.80 กรัมต่อกิโลกรัม)

F = ปริมาตรช่องว่างภายในห้อง (ลิตร)

C = ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการกรรม

กรณี 10,000 ppm จะใช้ 1.0 เปอร์เซ็นต์

15,000 ppm จะใช้ 1.5 เปอร์เซ็นต์

20,000 ppm จะใช้ 2.0 เปอร์เซ็นต์

D = ความถ่วงจำเพาะของก๊าซ SO₂ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องกรรม

ที่ 25 องศาเซลเซียส D = 2.618 กรัมต่อลิตร

ที่ 27 องศาเซลเซียส D = 2.601 กรัมต่อลิตร

ที่ 30 องศาเซลเซียส D = 2.575 กรัมต่อลิตร

จากนั้นนำค่าน้ำหนักของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้มาหารน้ำหนักของผลลำไยที่ต้องนำมาเผา โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{น้ำหนักของผลลำไยที่นำมาเผา} = \frac{\text{Weight of SO}_2}{2} \quad (4)$$

จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณผลลำไยที่เผาอีก 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าปรับปรุงความเข้มข้นของ SO₂ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการผ่านรูรั่วต่างๆ ของห้องและประตูห้อง รวมไปถึงความบริสุทธิ์ของผลลำไยที่ใส่

(3) หาคความเข้มข้นของก๊าซ SO₂ ที่เหลือตกค้างภายในห้องหลังจากสิ้นสุดการกรรม (S)

จากสมการที่ 3 $S = C \times F \times D$

เมื่อ $C = \frac{2}{100}$

F = ปริมาตรช่องว่างภายในห้อง (Free Space)

D = 2.575 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

(4) หาปริมาตรช่องว่างภายในห้อง (Free Space)

ลำไยพันธุ์อีดอขนาดผลเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.4 เซนติเมตรสมมติให้มีขนาดผลเป็นทรงกลม

โดยมีจำนวนประมาณ 112 – 122 ผลต่อกิโลกรัม เลือกใช้ 112 ผล

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรต่อผล} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \\ &= \left(\frac{4}{3}\right) \pi (0.012)^3 \\ &= 7.24 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรต่อ 1 กิโลกรัม} &= 112 \times (7.24 \times 10^{-6}) \\ &= 8.11 \times 10^{-4} \text{ ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทั้งหมดต่อลำไย 7,200 กิโลกรัม} &= 7,200 \times (8.11 \times 10^{-4}) = 5.838 \text{ ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Free Space} &= 72.50 - 5.838 = 66.662 \text{ ลูกบาศก์เมตร} \\ &= 66,662 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3 จะได้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลืตกค้างภายในห้องหลังจากสิ้นสุดการรมคือ

$$\begin{aligned} S &= \left(\frac{2}{100}\right) \times 66,662 \times 2.575 \\ S &= 3,433.093 \text{ กรัม (7.57 ปอนด์)} \end{aligned}$$

เนื่องจากทำการทดสอบโดยทำการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ด้วยห้องเปล่าจึงไม่คิดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างสูงสุด (M)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ 1} \quad \text{น้ำหนักของก๊าซ SO}_2 &= M + S \\ \text{จะได้} \quad \text{น้ำหนักของก๊าซ SO}_2 &= 0 + 3,433.093 \\ \text{ดังนั้น} \quad \text{น้ำหนักของก๊าซ SO}_2 &= 3,433.093 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าน้ำหนักของก๊าซ SO₂ ที่ได้มาหารน้ำหนักของผงกำมะถันที่ต้องนำมาเผา โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \text{น้ำหนักของผงกำมะถันที่นำมาเผา} &= \frac{3,433.093}{2} \\ \text{ดังนั้น} \quad \text{น้ำหนักของผงกำมะถันที่นำมาเผา} &= 1,716.55 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากนั้นเพิ่มปริมาณผงกำมะถันที่เผาอีก 1.2 เท่าของน้ำหนักของผงกำมะถันที่นำมาเผาเพื่อเป็นค่าปรับปรุงความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งขึ้นอยู่กับการผ่านรูรั่วต่าง ๆ ของห้องและประตูห้อง

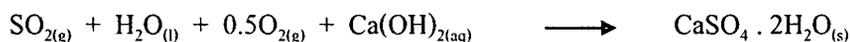
$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \text{น้ำหนักของผงกำมะถันที่นำมาเผาจริง} &= 1,716.55 \times 1.2 \text{ กรัม} \\ &= 2,059.86 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำหนักของผงกำมะถันที่นำมาเผาจะเท่ากับ 2,059.86 กรัม หรือประมาณ 2 กิโลกรัม

ในการทำงานเดียวกันถ้าใช้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการรมเป็น 15,000, 10,000 และ 5,000 ppm จะต้องใช้ผงกำมะถันที่นำมาเผาจะประมาณเท่ากับ 1.5, 1.0 และ 0.5 กิโลกรัมตามลำดับ

(5) การคำนวณหาปริมาณปูนขาวที่ใช้สำหรับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่หอบำบัด



ดุลสมการ

$$(32.064 + (2 \times 15.994)) + ((1.00797 \times 2) + 15.9984) + (0.5 \times 15.9984 \times 2) + (40.08 + (2 \times (15.9984 + 1.00797))) \longrightarrow (40.08 + 32.064 + (4 \times 15.9984) + (2 \times 1.00797 \times 2) + (2 + 15.9984))$$

จะได้

$$64.06 + 18.01 + 15.99 + 74.09 \longrightarrow 172.45$$

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำปูนใสต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

$$\frac{\text{Ca}(\text{OH})_2}{\text{SO}_2} = \frac{74.09}{64.06} = 1.15$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ถังเตรียมน้ำปูนใส



ดุลสมการ

$$56.08 + 18.01 \longrightarrow 74.09$$

อัตราส่วนโดยโมลของน้ำปูนใสต่อปูนขาว

$$\frac{\text{Ca}(\text{OH})_2}{\text{CaO}} = \frac{74.09}{56.08} = 1.32$$

ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของปูนขาวต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ $1.15 / 1.32 = 0.87$

แสดงว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนขาว (CaO) = $0.87 \times 3,433.093 = 2,987$ กรัม หรือประมาณ 3.0 กิโลกรัม (6.60 ปอนด์)

ในทำนองเดียวกันถ้าใช้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการรมเป็น 15,000, 10,000 และ 5,000 ppm จะต้องใช้ปริมาณปูนขาวประมาณเท่ากับ 2.2, 1.5 และ 0.8 กิโลกรัม ตามลำดับ

(6) การคำนวณหาค่าอัตราการไหลของก๊าซ(G) มีหน่วยปอนด์ต่อวินาที

อากาศในห้องมีปริมาตร 66.662 ลูกบาศก์เมตร (2,354.15 ลูกบาศก์ฟุต) โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ และมีค่าความหนาแน่นอากาศประมาณ = 1.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (0.10 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

$$\begin{aligned} \text{จาก } m_{air} &= \rho \times V \\ m_{air} &= 0.10 \times 2,354.15 \\ m_{air} &= 235.42 \quad \text{ปอนด์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{SO_2} &= 7.57 && \text{ปอนด์} \\
 m_{air} + m_{SO_2} &= 235.42 + 7.57 \\
 \text{จะได้มวลรวม} &= 242.99 && \text{ปอนด์}
 \end{aligned}$$

อัตราการไหลของก๊าซโดยมวลหาจากการประมาณเวลาที่ใช้ประมาณ 20 นาที

$$\text{จะได้} \quad G = \frac{242.99}{20 \times 60} = 0.202 \text{ ปอนด์ต่อวินาที}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของก๊าซโดยมวล (G) จะเท่ากับ 0.202 ปอนด์ต่อวินาที

(7) การคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส, (L)

จากข้อมูลทราบว่าอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใสที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 10-15 ลิตรของน้ำปุ๋นใสต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตรของอัตราการไหลของก๊าซ เลือกใช้ 10 ลิตรของน้ำปุ๋นใสต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้เวลาในการบำบัด 20 นาที

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการไหลของก๊าซ (G)} &= \frac{66.662}{20} = 3.333 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อนาที} \\
 &= 117.708 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส (L)} = 3.333 \times 15 = 50 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใสโดยมวลหาได้ดังนี้

$$\text{ปริมาตรน้ำ} = 50 \text{ ลิตรต่อนาที} \times 10 \text{ นาทีหมุนเวียนน้ำ} = 500 \text{ ลิตร} = 17.66 \text{ ลูกบาศก์ฟุต}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น น้ำหนักของน้ำทั้งหมด} &= 17.66 \times 62.24 \text{ ลูกบาศก์ฟุต} \times \text{ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต} \\
 &= 1,099.16 \text{ ปอนด์}
 \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ปุ๋นขาว 3,000 กรัม} = 6.60 \text{ ปอนด์}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำ} + \text{น้ำหนักของปุ๋นขาว} = 1,099.16 + 6.60 = 1,105.76 \text{ ปอนด์}$$

$$\text{ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใสโดยมวล} = \frac{1,105.76}{10 \times 60} = 1.84 \text{ ปอนด์ต่อวินาที}$$

(8) การหาความหนาแน่นของก๊าซโดยมวล, (ρ_g)

- สมมติให้ความหนาแน่นก๊าซเฉลี่ยเท่ากันทั้งห้อง
- ปริมาตรอากาศใน = 2,354.15 ลูกบาศก์ฟุต
- มวลของก๊าซ = 242.99 ปอนด์

$$\text{ดังนั้นความหนาแน่นของก๊าซโดยมวล } (\rho_g) = \frac{242.99}{2,354.15} = 0.103 \text{ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

(9) การหาความหนาแน่นของของเหลวโดยมวล, (ρ_l)

- ปริมาตรของของเหลว = 17.66 ลูกบาศก์ฟุต
- มวลของของเหลว = 1,105.76 ปอนด์

ดังนั้น ความหนาแน่นของของเหลวโดยมวล (ρ_l) = $\frac{1,105.76}{17.66} = 62.61$ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

(10) การคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญในกราฟความสัมพันธ์ของหอบำบัด

$$\text{จากสมการ } X = \frac{L}{G} \left[\frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{0.5}$$

โดยที่ X คือ พารามิเตอร์แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหล, ความหนาแน่นของน้ำปุนไสและก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถหาได้จาก

$$L = 1.84 \text{ ปอนด์ต่อวินาที}$$

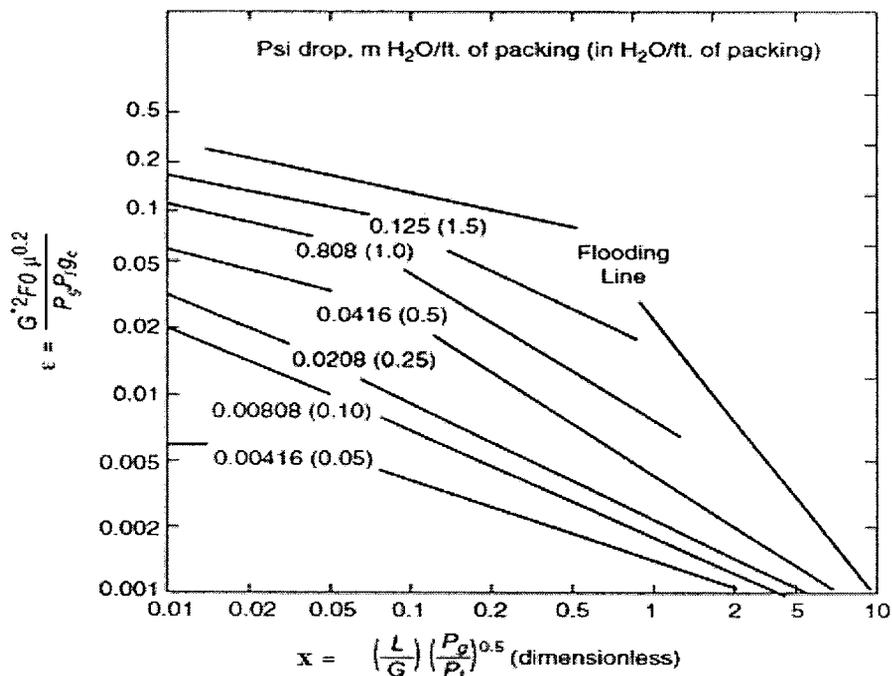
$$G = 0.202 \text{ ปอนด์ต่อวินาที}$$

$$\rho_g = 0.103 \text{ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

$$\rho_l = 62.61 \text{ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

แทนในสมการจะได้

$$X = \frac{1.84}{0.202} \left[\frac{0.103}{62.61} \right]^{0.5} = 0.37$$



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของการท่วมของน้ำและความดันตก

ที่มา: Environmental Engineer's Mathematics Handbook, 2005.

จากภาพที่ 7 ในแกนแนวนอน $X = 0.37$ เลือกเส้น Psi drop of packing ที่เส้น 0.05 นิ้วของน้ำต่อวัสดุตัวกลาง (Packing) อ่านค่าจากกราฟในแนวตั้ง $\varepsilon = 0.002$

$$\text{จากสมการ} \quad G' = \frac{[(\varepsilon)(\rho_g)(\rho_l)(g_c)]^{0.5}}{[(F)(\phi)(\mu_l)^{0.2}]^{0.5}}$$

เมื่อ $\varepsilon = 0.002$

$\rho_g = 0.103$ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

$\rho_l = 62.61$ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

$g_c = 32.2$ ฟุตต่อวินาที²

$\phi = 1.0$

$\mu_l = 0.8$ เซนติพอยส์ (Environmental Engineer's Mathematics Handbook, 2005)

$F = 255$ โดยเลือกใช้ Raschig Ring, Ceramic ขนาด 0.75 นิ้วดังแสดงในภาพที่ 8

Type of Packing	Mat'l.	Nominal Packing Size, in										
		¾	¾	¾	¾	¾	1	1¼	1½	2	3	3½
Super Intalox	Ceramic	—	—	—	—	—	60	—	—	30	—	—
Super Intalox	Plastic	—	—	—	—	—	33	—	—	21	16	—
Intalox saddles	Ceramic	725	330	200	—	145	98	—	52	40	22	—
Hy-Pak rings	Metal	—	—	—	—	—	42	—	—	18	15	—
Pall rings	Plastic	—	—	—	97	—	52	—	40	25	—	16
Pall rings	Metal	—	—	—	70	—	48	—	28	20	—	16
Beri saddles	Ceramic	900 ^a	—	240 ^a	—	170 ^b	110 ^b	—	65 ^b	45 ^a	—	—
Raschig rings	Ceramic	1,600 ^{b,c}	1,000 ^{b,c}	580 ^c	380 ^c	255 ^c	155 ^d	125 ^{e,x}	95 ^e	65 ^e	37 ^{e,x}	—
Raschig rings ¾-in wall	Metal	700 ^a	390 ^a	300 ^a	170	155	115 ^a	—	—	—	—	—
Raschig rings ½-in wall	Metal	—	—	410	290	220	137	110 ^a	83	57	32 ^a	—
Tellerettes	Plastic	—	—	—	—	—	40	—	—	20	—	—
Maspak	Plastic	—	—	—	—	—	—	—	—	32	20	—
Lessing exp.	Metal	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	—
Cross partition	Ceramic	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	—

^a ¾ Wall ^b ½ Wall ^c ¾ Wall ^d ¾ Wall ^e Packing factors obtained in 16- and 30-in. I.D. towers ^x Extrapolated

ภาพที่ 8 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวัสดุตัวกลาง

ที่มา: Fortran Programs for chemical Process Design, 1995.

แทนค่าในสมการ จะได้

$$G' = \frac{[(0.002)(0.102)(62.61)(32.2)]^{0.5}}{[(255)(1)(0.8)^{0.2}]^{0.5}}$$

$$= \frac{0.643}{15.616}$$

$$= 0.041 \text{ (ปอนด์ต่อวินาที).ฟุต}^2$$

จะได้ $A = \frac{G}{G'} = \frac{0.202}{0.041} = 4.93 \text{ ตารางฟุต}$

จากสมการ $dc = 1.13A^{0.5} = 1.13 \times (4.93)^{0.5} = 2.509 \text{ ฟุต} = 0.76 \text{ เมตร}$

ดังนั้น เลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบำบัดขนาด 0.80 เมตร หรือ 80 เซนติเมตร

(11) การคำนวณหาขนาดความสูงของชุดวัสดูดั้วกลาง

จากสมการ $z = N_{OG} \times H_{OG}$ (5)

เมื่อ Z คือ ความสูงของชุดวัสดูดั้วกลาง (ฟุต)

N_{OG} คือ Number of transfer unit based on overall gas film coefficient (ไร้หน่วย)

H_{OG} คือ Height of transfer unit based on overall gas film coefficient (ฟุต)

ค่า Height of transfer unit (H_{OG}) มีช่วงค่าอยู่ที่ 1 - 4 ฟุต (Environmental Engineer's Mathematics Handbook, 2005) ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า $H_{OG} = 1$ ฟุต โดยสมมติให้น้ำมีความสามารถในการละลายน้ำสูงสุด

จากสมการ $N_{OG} = \ln \frac{Y_1}{Y_2}$ (6)

เมื่อ $Y_1 = \frac{y_1}{1-y_1}$ เนื่องจาก y_1 มีค่าน้อยมากจึงพิจารณาให้ $Y_1 = y_1 = 20,000$ ส่วนในล้านส่วน

$Y_2 = \frac{y_2}{1-y_2}$ เนื่องจาก y_2 มีค่าน้อยมากจึงพิจารณาให้ $Y_2 = y_2 = 400$ ส่วนในล้านส่วน

y_1 = ความเข้มข้นของก๊าซขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

y_2 = ความเข้มข้นของก๊าซขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

จากสมการ 6 $N_{OG} = \ln \frac{Y_1}{Y_2}$

จะได้ $N_{OG} = \ln \frac{20,000}{400} = 3.91$

จากสมการ 5 $z = N_{OG} \times H_{OG}$ โดยเลือกใช้ค่า $H_{OG} = 1$ ฟุต

จะได้ $z = 3.91 \times 1 = 3.91 \text{ ฟุต} = 1.19 \text{ เมตร}$

ดังนั้น ความสูงของชุดวัสดูดั้วกลางประมาณ 1.2 เมตร

ในการทำงานเดียวกันถ้าใช้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อสิ้นสุดการบำบัดเป็น 60 ppm จะต้องใช้ความสูงของชุดวัสดูดั้วกลางประมาณ 1.8 เมตร ซึ่งจะสูงมากเมื่อทำการสร้างหอบำบัด และไม่น่าจะสามารถทำการบำบัดได้จริงตามทฤษฎี เนื่องจากมีปัจจัยอื่นๆ ต้องคำนึงประกอบด้วย

(12) การคำนวณหากำลังในการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

จากการคำนวณอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยตามทฤษฎี = 50 ลิตรต่ออนาที ที่ไม่รวมการสูญเสียเฮด ดังนั้นจึงควรเพิ่มอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยอีก 50 เปอร์เซ็นต์ = $50 \times \frac{150}{100} = 75$ ลิตรต่ออนาที เพื่อสำหรับกรณีในระบบมีการสูญเสียเฮดจากระยะสูบลึกขึ้น และการสูญเสียเฮดเนื่องจากความเสียดทาน

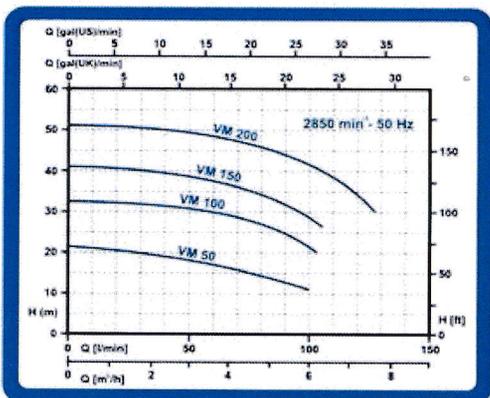
ข้อมูลประกอบการคำนวณ

- ที่อัตราการไหลของน้ำปุ๋ย (L) = 50-75 ลิตรต่ออนาที
- การสูญเสียเฮดรวมไม่เกิน 30 เมตร

ในทางปฏิบัติการเลือกเครื่องสูบน้ำใช้งานซึ่งต้องการกำลังขับจากต้นกำลังโดยให้ได้อัตราการไหลตามต้องการคือ 75 ลิตรต่ออนาที และที่การสูญเสียเฮดรวมไม่เกิน 30 เมตร ซึ่งเป็นที่ออกแบบการใช้งานเอาไว้ จึงควรเลือกเครื่องสูบน้ำขนาด 1 แรงม้าตามตารางสินค้า ดังแสดงในภาพที่ 9

Series VM
SINGLE IMPELLER CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS



TYPE - MODEL		Nominal Power		Input Power		I (A)		Capacity (m³/h - l/min)														DNA	DNM			
								Total head (m)																		
1- Singlephase	3- Threephase	kW	HP	1- kW	3- kW	1x230V 50Hz	3x400V 50Hz	0.6	1.2	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.4	12	15	18	DNA	DNM				
Total head (m)																										
VM 50	VM 50 T	0.37	0.5	0.59	0.65	2.8	1.1	21.5	20	20	18	17	15	12										1" G	1" G	
VM 100	VM 100 T	0.74	1	1.16	1.17	5.7	2	33	32.5	32	31	29	28	25	21										1" G	1" G
VM 150	VM 150 T	1.1	1.5	1.85	1.85	8.8	3.4	40.5	40	39.5	38	37.5	34.5	32	27.5										1" G	1" G *
VM 200	VM 200 T	1.85	2.2	2.22	2.30	10.3	4.2	50.5	50	49	48	46	44.5	42	39	35									1" G	1" G *

ภาพที่ 9 แสดงรายละเอียดของเครื่องสูบน้ำ

ที่มา : Soiha(www, 2010)

(13) การคำนวณหากำลังในการทำงานของพัดลม

$$\begin{aligned} \text{จากอัตราการไหลของก๊าซ (G)} &= \frac{66.662}{20} = 3.333 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที (CMM)} \\ &= 117.708 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่ออนาที (CFM)} \end{aligned}$$

สำหรับกรณีไม่รวมการสูญเสียเสด ดังนั้นจึงควรเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซอีก 250 เปอร์เซ็นต์ = $117.708 \times \frac{250}{100} = 294.27$ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (CFM) เพื่อสำหรับกรณีในระบบมีการสูญเสียเสดจากระยะสูบยกขึ้น และการสูญเสียเสดเนื่องจากความเสียดทานซึ่งจะค่าค่อนข้างสูงมากถ้าระบบเดินท่อแยกเข้าสำหรับหลายห้องรม

ข้อมูลประกอบการคำนวณ

- ที่อัตราการไหลของก๊าซ 117.708 - 294.27 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (3.333-8.333 CMM)
- การสูญเสียเสดรวมไม่เกิน 75 MM.WG ที่รอบการหมุน 2,800 - 2,840 RPM

ในทางปฏิบัติการเลือกพัดลมใช้งาน จึงควรเลือกเครื่องสูบน้ำขนาด 1 แรงม้าตามตารางสินค้า ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยสามารถปรับอัตราการไหลของพัดลมลงได้ตามที่ต้องการด้วยการใช้เครื่องปรับรอบการหมุนอินเวอร์เตอร์ (Invertor) สำหรับชนิดของพัดลมที่ใช้งานควรเลือกแบบที่มีการรั่วไหลของก๊าซน้อยที่สุด โดยโครงสร้างพัดลมควรเลือกใช้ที่ทนกรดได้ดี เช่น สแตนเลส หรือ ไฟเบอร์กราส ซึ่งมีราคาสูงกว่าพัดลมทั่ว ๆ ไปมาก เป็นมีความคงทนและปลอดภัยในการใช้งาน



DAI	HP	MOTOR			PRESSURE		AIR VOLUME	
		RPM		V	MM.WG		CMM	
		4P	2P		4P	2P	4P	2P
BO-F4103	1/2	1450	2800	220/380	15	65	11	20
BO-F4123	1	1450	2800	220/380	20	75	27	46
BO-F4143	2	1450	2800	220/380	30	105	30	75
BO-F4163	3	1450	2800	220/380	40	150	48	97
BO-F4183	3	1450	2800	220/380	50	195	87	104
BO-F4183	5	-	2800	220/380	-	195	-	104
BO-F4203	5	1450	-	220/380	60	245	113	174
BO-F4243	7.5	1450	-	220/380	150	-	212	-

ภาพที่ 10 แสดงรายละเอียดของพัดลม

ที่มา : padlomdee(www, 2010)

1.2 ทำการประเมินราคาต้นทุนของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก สำหรับขนาดห้องรมแต่ละขนาด

ในการประเมินราคาต้นทุนของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกจะมี ส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนของราคาต้นทุนวัสดุ และส่วนของราคาค่าแรงในการก่อสร้าง ในบาง ส่วนประกอบของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกอาจต้องใช้การเหมาทำ เพื่อ สร้างส่วนประกอบขึ้นมาเฉพาะสำหรับงาน เช่น การทำช่องกระจกซึ่งตัวโครงจะต้องเป็นสแตนเลสมีบาน พับ กระจกใส และแผ่นยางกันน้ำซึม หรือตัวตะแกรงสแตนเลสพร้อมขาตั้งรองรับวัสดุตัวกลางภายในหอ บำบัด เป็นต้น ดังแสดงรายการต่างๆ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาต้นทุนวัสดุและค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบหอบำบัด

อุปกรณ์	จำนวน (ชิ้น)	ราคาต่อหน่วย (บาท)	รวม (บาท)
1. บ่อซีเมนต์กลมกลวง ขนาด 1 × 0.4 เมตร	7	160	1,120
2. บ่อซีเมนต์กลมปิดท้าย ขนาด 1 × 0.4 เมตร	3	322	966
3. ท่อ พีวีซีขนาด 1 นิ้ว	3	44	132
4. ท่อ พีวีซีขนาด 2 นิ้ว	2	75	150
5. ท่อ พีวีซีขนาด 4 นิ้ว	2	386	772
6. ท่อ พีวีซีขนาด 6 นิ้ว	3	568	1,704
7. ท่อ พีวีซีขนาด 8 นิ้ว	1	986	986
8. ข้อต่อขนาดต่างๆ	-	-	6,558
8.1 ข้อต่อสามทางลดพีวีซี			
▪ ขนาด 4 นิ้ว - 2 นิ้ว	1	91	91
▪ ขนาด 6 นิ้ว - 4 นิ้ว	2	1,500	3,000
▪ ขนาด 8 นิ้ว - 6 นิ้ว	1	1,183	1,183
8.2 ข้อต่องอพีวีซี 90 องศา			
▪ ขนาด 1 นิ้ว	2	12	24
▪ ขนาด 6 นิ้ว	1	240	240
8.3 ฝาครอบท่อน้ำ พีวีซี ขนาด 6 นิ้ว	2	411	822
8.4 บอลวาล์ว พีวีซี ขนาด 2 นิ้ว	2	120	240
8.5 ฟุตวาล์วทองเหลือง ขนาด 2 นิ้ว	1	520	520
8..6 ข้อต่อสามพีวีซีขนาด 6 นิ้ว	1	438	438

9. อุปกรณ์อื่น ๆ	-	-	3,385
9.1 ปูนซีเมนต์ฉาบสำเร็จรูป	2	482	964
9.2 อิฐมอญแดง ขนาด 3 × 3 นิ้ว	50	37	1,850
9.3 อุปกรณ์ประปา	-	-	460
9.4 สติลโคน สีดำ	3	37	111
10. พัดลม ขนาด 1 แรงม้า ชนิดไฟเบอร์กราส ทนกรด	1	30,000	30,000
11. เครื่องสูบน้ำขนาด 1 แรงม้า ชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	1	7,500	7,500
12. ตะแกรงสแตนเลสขนาด 4 × 8 ฟุตช่องกว้าง 22 มิลลิเมตร ยาว 50.8 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร	2	980	1,960
13. สแตนเลสแผ่น ขนาด 4 × 8 ฟุต หนา 1.2 มิลลิเมตร	1	1,200	1,200
14. วัสดุตัวกลาง ขนาด	7,500	1	7,500
15. หัวฉีดทองเหลือง	8	100	800
รวม	-	-	64,733

ค่าแรงงานการติดตั้งระบบประมาณเท่ากับ 30% ของราคาอุปกรณ์

$$= 0.3 \times 64,733$$

$$= 19,419.9 \text{ บาท}$$

ดังนั้นเงินลงทุนเริ่มต้น

$$= 16,108.80 + 64,733$$

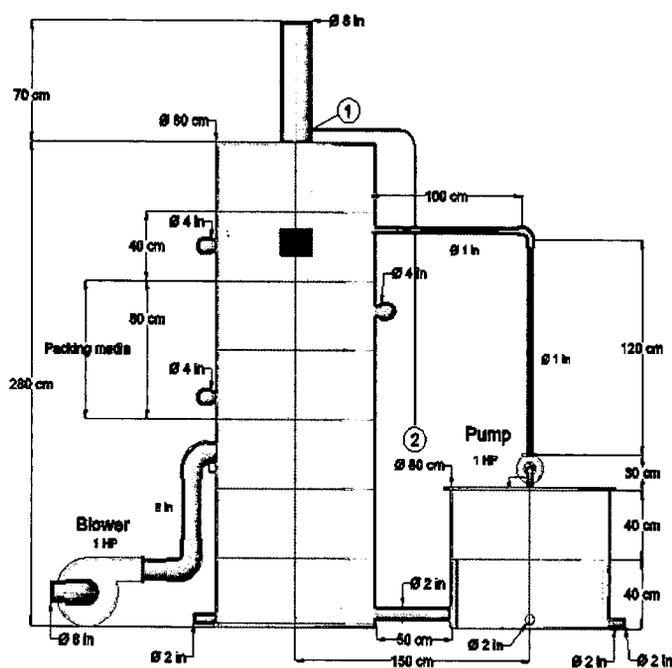
$$= 84,152.9 \text{ บาท}$$

$$\cong 85,000 \text{ บาท}$$

จากตารางที่ 2 เป็นรายการวัสดุและราคาต้นทุนการก่อสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก ซึ่งใช้กับขนาดห้องรมที่ใหญ่ที่สุดในตารางที่ 1 ซึ่งมีการคำนวณส่วนประกอบต่าง ๆ ของหอบำบัดเอาไว้แล้วในรายการคำนวณข้างต้น สำหรับในกรณีห้องรมขนาดอื่น ๆ ก็สามารถคำนวณและประมาณราคาต้นทุนได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นทางที่ผู้วิจัยจึงได้ทำตารางสรุปการออกแบบของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกเอาไว้ดังแสดงในตารางที่ 3 และแสดงลักษณะของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกต้นแบบ ดังในรูปที่ 11

ตารางที่ 3 สรุปการประมาณการออกแบบของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก

ขนาดห้อง (เมตร) (ยาว×กว้าง×สูง)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)/ ความสูงชั้นวัสดุ กลาง(เซนติเมตร)	ความสูงหอรวม (เซนติเมตร)	พัดลม (CFM/Head in WG.)	เครื่องสูบน้ำ (LPM/Head in meter)	ราคาประมาณ ของการสร้าง หอบำบัด (บาท)
3.6 × 2.5 × 2.4 20.7	50/60	240	200/2.0	50/15	60,000
4.8 × 2.4 × 2.4 27.6	50/80	280	200/2.0	50/20	65,000
3.6 × 3.6 × 2.4 31.1	60/80	280	250/3.0	60/20	70,500
4.8 × 3.6 × 2.4 41.5	60/100	320	250/3.0	60/25	75,000
4.8 × 4.8 × 2.4 55.3	80/100	320	300/4.0	70/25	80,000
5.0 × 5.0 × 2.9 72.5	80/120	320	350/5.0	70/30	85,000



ภาพที่ 11 ลักษณะหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกต้นแบบ

กิจกรรมที่ 2 การเขียนแบบและออกแบบส่วนประกอบหอบำบัด SO₂แบบมาตรฐาน

ในหัวข้อที่ผ่านมาทางทีมผู้วิจัยได้นำเสนอการประเมินรูปแบบของห้องรมขนาดต่าง ๆ ที่มีการใช้งานกันโดยทั่วไป ซึ่งจะต้องสอดคล้องกันขนาดหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกด้วย ดังนั้นในการดำเนินงานถัดมาจะนำเสนอการศึกษาวิจัยในการสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกที่สามารถใช้ระบบหมุนเวียนการบำบัด เพื่อให้เกิดมาตรฐานที่ดีในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ตามมาตรฐานการปล่อยอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 กำหนดไว้ว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งได้มาจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่มีการเผาไหม้ เช่นกำมะถันผงจะสามารถปล่อยได้ไม่เกิน 60 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จากงานวิจัยที่ทีมผู้วิจัยดำเนินการภายใต้การสนับสนุนของ สกว. พบว่าส่วนใหญ่ผู้ประกอบการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ในช่วงแรกของการบำบัดเกินที่มาตรฐานกำหนด มีการรายงานเพียงการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ช่วงสุดท้ายของการบำบัดเท่านั้นว่าต่ำกว่ามาตรฐาน

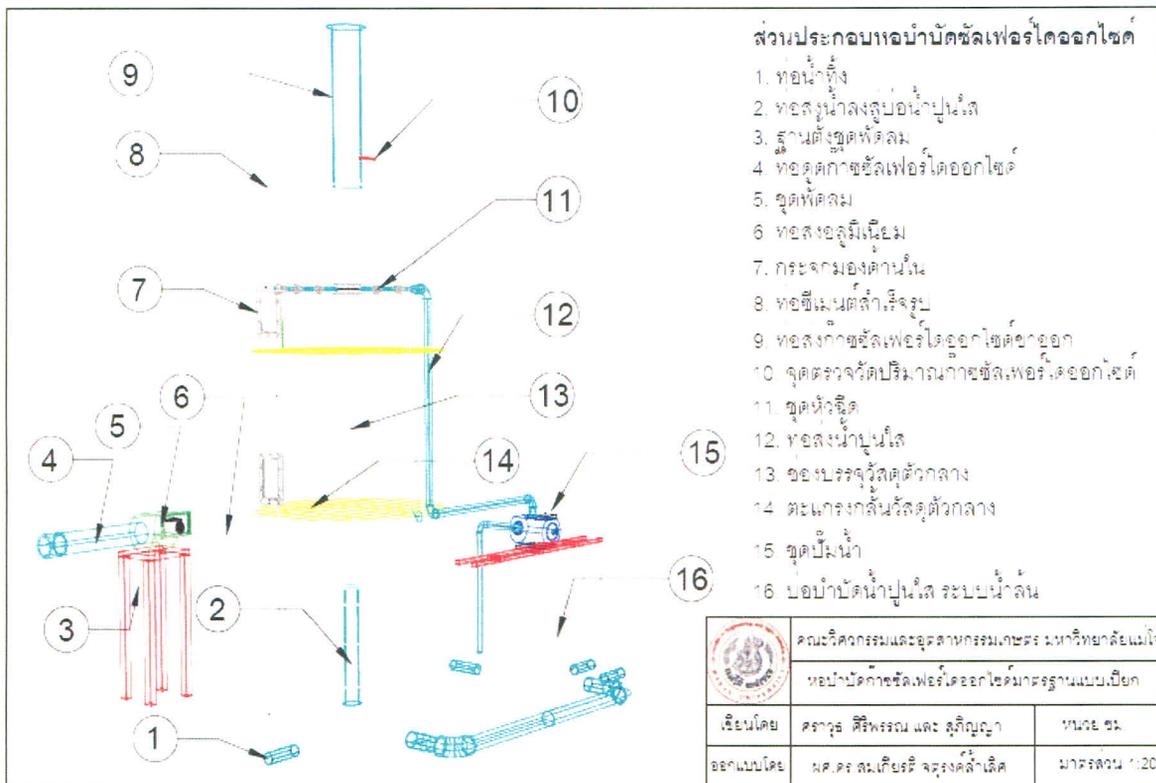
นอกจากนี้ตามระเบียบกรมโรงงานยังกำหนดการขึ้นทะเบียนผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องระบบป้องกันสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2528 ไว้ด้วยซึ่งครอบคลุมหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเปียก (Wet Scrubber) โดยจะต้องมีผู้ปฏิบัติงานประจำเครื่องระบบป้องกันสิ่งแวดล้อมเป็นพิษที่มีคุณวุฒิทางด้านสาขาสุขภาพ สิ่งแวดล้อม เคมีเทคนิค หรือวิศวกรรมเครื่องกล เป็นต้น เพื่อควบคุมความปลอดภัย

ซึ่งเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาสำคัญของการดำเนินการวิจัยในขั้นตอนนี้เพื่อสร้างระบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกที่สามารถใช้ระบบหมุนเวียนการบำบัดขึ้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

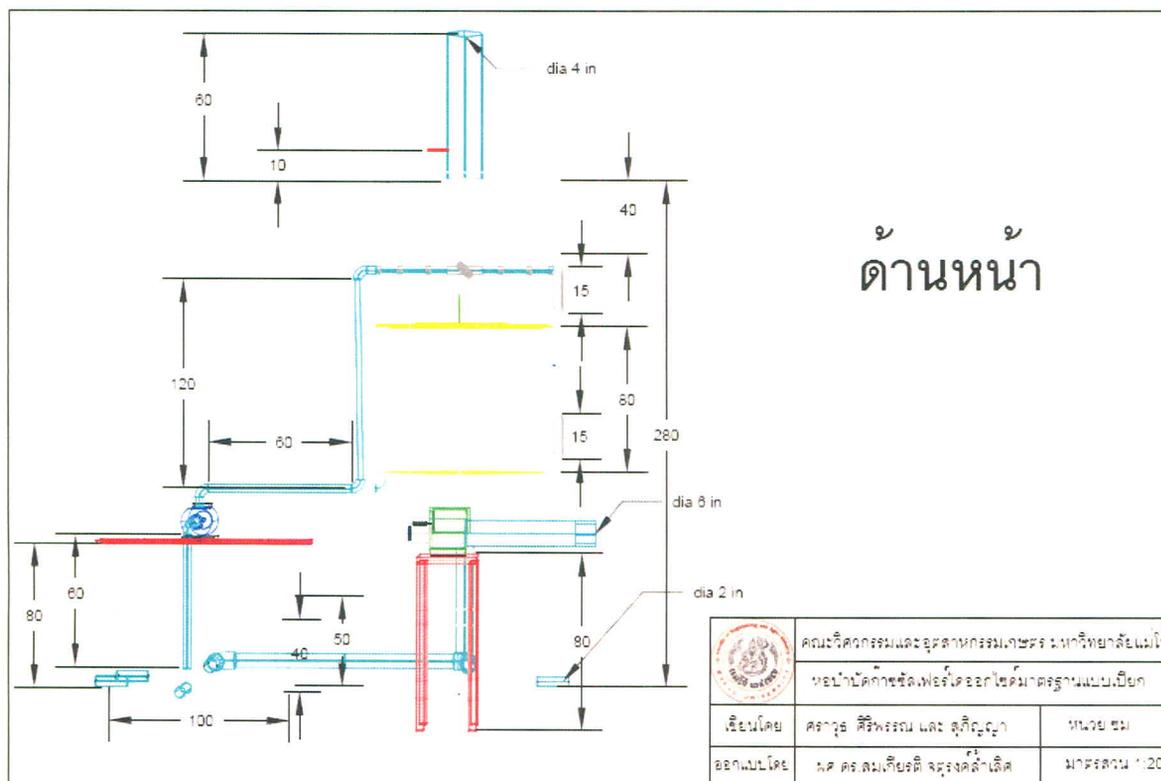
2.1 การก่อสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก

จากต้นแบบของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกดังแสดงในรูปที่ 11 ทางทีมผู้วิจัยจึงได้เขียนแบบมาตรฐานขึ้นเพื่อใช้ประกอบการก่อสร้างหอบำบัดให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมดังแสดงในภาพที่ 12 ถึง 14 จากนั้นจึงทำการพัฒนาระบบหมุนเวียนการบำบัดขึ้นต่อ โดยใช้หลักการออกแบบตามแนวคิดที่จะนำเอาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ก่อนจะปล่อยออกทางตอนปลายปล่อยระบายไอเสีย ซึ่งยังมีความเข้มข้นของมลพิษสูงอยู่ (มากกว่า 2,000 ppm) กลับมาทำการบำบัดซ้ำอีกรอบในหอบำบัดเดิมจนกว่าจะมีความเข้มข้นของมลพิษต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดจึงจะยอมปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ดังแสดงในภาพที่ 15

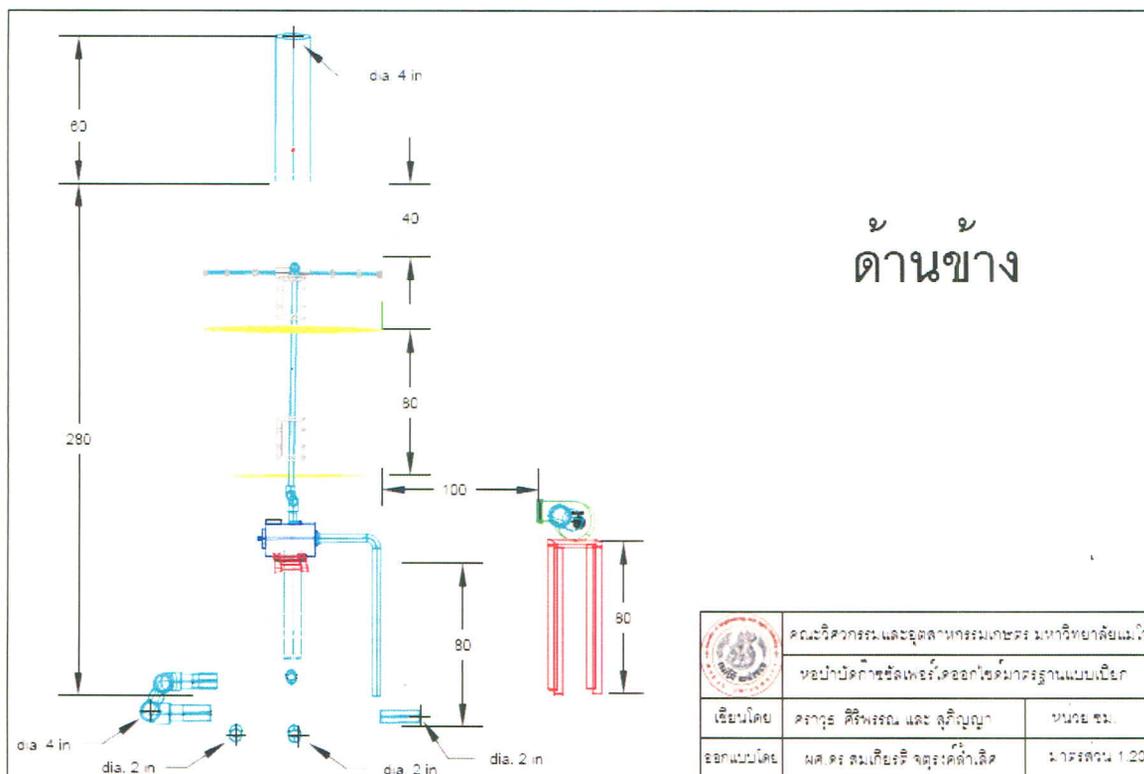
สำหรับขั้นตอนการก่อสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัด ทางทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการก่อสร้างตามต้นแบบที่วางไว้ในช่วงเวลาการดำเนินงานของ 6 เดือนแรก โดยทำการก่อสร้างเสร็จสิ้นแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 16 ถึง 23



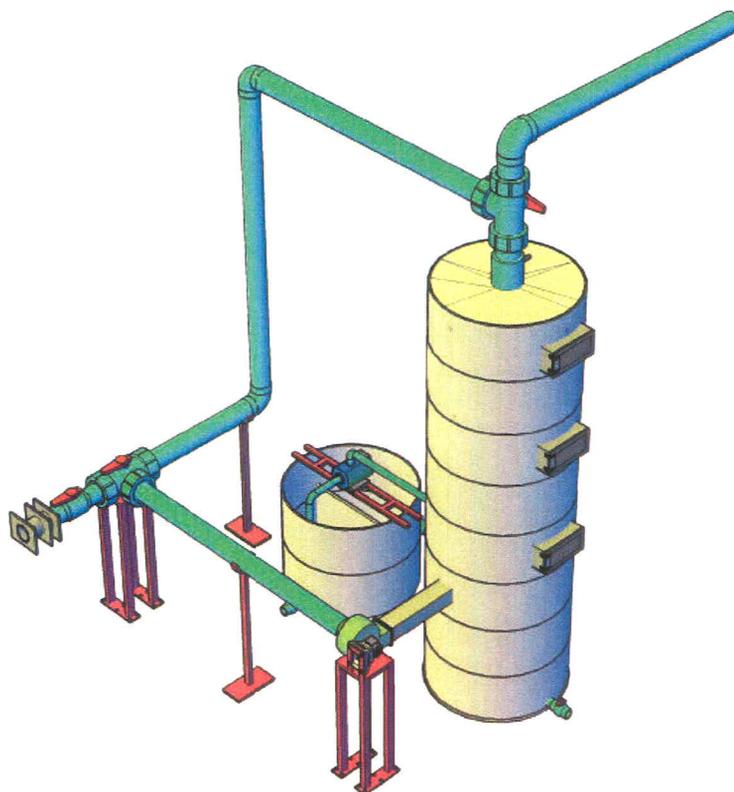
ภาพที่ 12 แบบก่อสร้างบ่อน้ำดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก



ภาพที่ 13 แบบก่อสร้างบ่อน้ำดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก (ต่อ)



ภาพที่ 14 แบบก่อสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก (ต่อ)



ภาพที่ 15 ต้นแบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ได (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกด้วยระบบหมุนเวียนการบำบัด



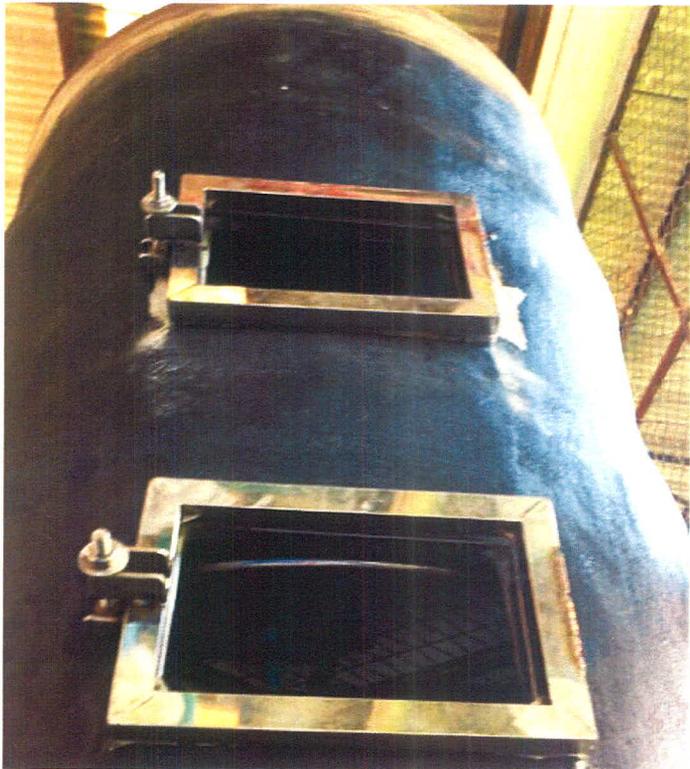
ภาพที่ 16 การดำเนินงานก่อสร้างหอบำบัด



ภาพที่ 17 การดำเนินงานก่อสร้างถังน้ำปุ๋ยใส



ภาพที่ 18 การดำเนินงานติดตั้งท่อน้ำ และระบบเครื่องสูบน้ำ



ภาพที่ 19 การดำเนินงานก่อสร้างช่องกระจก และตะแกรง



ภาพที่ 20 การดำเนินงานก่อสร้างหัวฉีดน้ำในหอบำบัด



ภาพที่ 21 การดำเนินงานติดตั้งระบบพัดลม



ภาพที่ 22 การดำเนินงานติดตั้งข้อต่อระบบหมุนเวียนการบำบัด

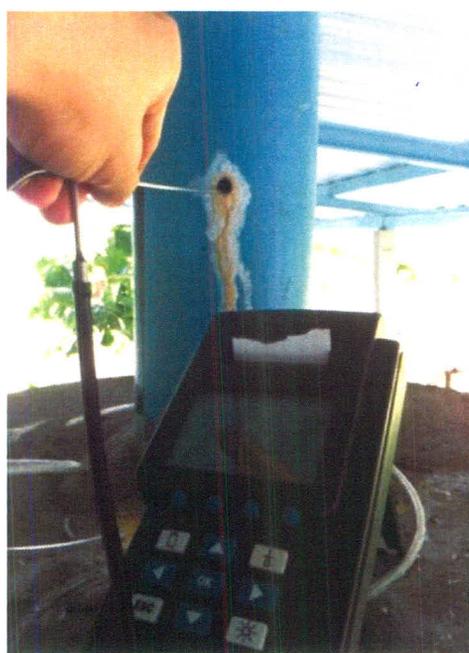


ภาพที่ 23 การดำเนินงานก่อสร้างและตรวจสอบรอยรั่วของระบบหอบำบัด

2.2 การตรวจวัดค่าอัตราการไหลของพัดลมและเครื่องสูบน้ำของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก

2.2.1 วิธีการศึกษา

เนื่องจากรายการคำนวณในทางทฤษฎีสามารถหาอัตราการไหลของพัดลมและเครื่องสูบน้ำได้ แต่ในทางปฏิบัติหอบำบัดจะมีความดันสถิต (Static head) ไม่ตรงกับที่คำนวณทางทฤษฎี เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของก๊าซจะไม่ตรงกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นจึงทำการตรวจวัดอัตราการไหลของพัดลมที่เกิดขึ้นจริงในหอบำบัด ซึ่งทำการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยในท่อทางออกดังแสดงในภาพที่ 24 โดยท่อทางออกจะมีขนาดท่อ 6 นิ้ว (0.1524 เมตร) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของท่อเท่ากับ 0.0182 ตารางเมตร จากการทดสอบพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อทางออกมีความเร็วเฉลี่ย 6.98 เมตรต่อวินาที จากนั้นนำความเร็วลมที่วัดจริงนำมาคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซ โดยนำความเร็วลมเฉลี่ยมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออกจะได้อัตราการไหลของก๊าซสูงสุดเท่ากับ 0.127 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (7.62 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที หรือ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)



ภาพที่ 24 การทดสอบวัดความเร็วลมเฉลี่ยในท่อทางออก

2.2.2 การคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซเมื่อปรับรอบมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์

เนื่องจากมอเตอร์ทำงานด้วยความเร็วรอบ 50 เฮิร์ตซ์ ถ้าต้องการให้ระบบมีอัตราการไหลที่ต่ำลงหรือแปรเปลี่ยนค่าได้ โดยทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของพัดลม โดยที่ความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม 50 เฮิร์ตซ์ (4 Pole) จะหมุนด้วยความเร็วรอบเต็มที่เท่ากับ 2,840 รอบต่อนาที เพราะฉะนั้นถ้าความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม 40 เฮิร์ตซ์จะเท่ากับ

2,272 รอบต่อนาที และความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลมที่ 30 เฮิร์ตซ์จะเท่ากับ 1,704 รอบต่อนาทีตัวเลขที่ได้มาจากกฎการแปรผันความเร็รรอบของพัดลม

จากความสัมพันธ์ของกฎการแปรผันความเร็รรอบกับอัตราการไหลของพัดลมถูกแสดงในสมการที่ 7 พบว่าอัตราการไหลของก๊าซมีค่าแปรผันตามความเร็รรอบดังนี้

$$\text{จาก} \quad \frac{CFM_2}{CFM_1} = \frac{rpm_2}{rpm_1} \quad (7)$$

กำหนดให้

ความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 50 เฮิร์ตซ์คือความเร็รรอบพัดลม (rpm_1) = 2,840 รอบต่อนาที

ความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 40 เฮิร์ตซ์คือความเร็รรอบพัดลม (rpm_2) = 2,272 รอบต่อนาที

ความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 30 เฮิร์ตซ์คือความเร็รรอบพัดลม (rpm_3) = 1,704 รอบต่อนาที

อัตราการไหลของก๊าซสูงสุดหาได้จากการนำความเร็วลมเฉลี่ยมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออกจะได้อัตราการไหลของก๊าซสูงสุด (CFM_1) = 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

จากความสัมพันธ์ของกฎการแปรผันความเร็รรอบของพัดลมเพื่อหาค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 40 เฮิร์ตซ์ และ ความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 30 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับโดยทำการแทนค่าในสมการที่ 7 จะได้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & \frac{CFM_2}{CFM_1} = \frac{rpm_2}{rpm_1} \\ \text{ที่ 40 เฮิร์ตซ์จะได้} \quad & \frac{CFM_2}{272} = \frac{2,272}{2,840} \\ & CFM_2 = 218 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & \frac{CFM_3}{CFM_1} = \frac{rpm_3}{rpm_1} \\ \text{ที่ 30 เฮิร์ตซ์จะได้} \quad & \frac{CFM_3}{272} = \frac{1,704}{2,840} \\ & CFM_3 = 165 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \end{aligned}$$

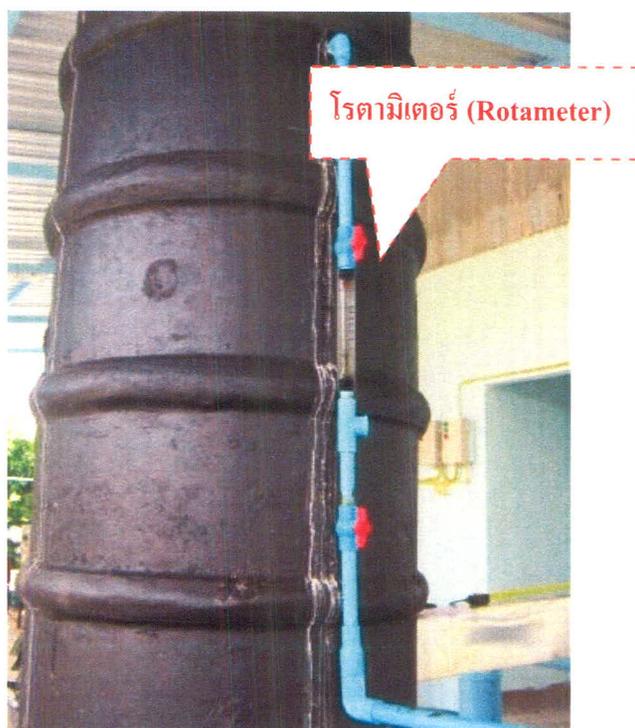
ดังนั้นจากการทดลองถ้าปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของพัดลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับรอบของความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม 50 เฮิร์ตซ์จะได้อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ถ้าปรับความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 40 เฮิร์ตซ์จะได้อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และถ้าปรับความเร็รรอบของมอเตอร์พัดลม 30 เฮิร์ตซ์จะได้อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีตามลำดับ

2.2.3 การทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบ

เนื่องจากรายการคำนวณในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการคำนวณในทางทฤษฎีแต่ในทางปฏิบัติหอบำบัดควรใช้อัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์เป็น 5–10 เท่าของอัตราการไหลของก๊าซที่ต้องการบำบัด ถ้าเลือกใช้ค่าอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์เป็น 6.5 เท่าของอัตราการไหลของก๊าซที่ต้องการบำบัดดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์} &= \text{CMM} \times 6.5 \\
 &= 7.62 \times 6.5 \\
 &= 49.53 \text{ ลิตรต่อนาที}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์ที่คำนวณตามทฤษฎี คือ 49.53 ลิตรต่อนาทีถ้าเพิ่มอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์อีก 25 เปอร์เซ็นต์จะได้อัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์ 61.91 ลิตรต่อนาที และถ้าเพิ่มอัตราการไหลอีก 50 เปอร์เซ็นต์จะได้อัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์ 74.29 ลิตรต่อนาทีทำการปรับตัวเลขให้ลงตัวเพื่อให้สะดวกในการทดสอบจริงเป็นสามระดับ คือ ปรับที่อัตราการไหล 50 60 และ 70 ลิตรต่อ นาทีทำการทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์จริงในระบบโดยใช้โรตاميเตอร์ (Rotameter) ดังแสดงในภาพที่ 25 วัดระดับอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์ที่ 50 60 และ 70 ลิตรต่อ นาทีตามที่ต้องการโดยทำการปรับบอลวาล์วในตำแหน่งทางเข้าเครื่องวัดอัตราการไหล



ภาพที่ 25 การวัดระดับอัตราการไหลของน้ำปุ๋ยมูลสัตว์โดยใช้โรตاميเตอร์ (Rotameter)

2.3 การศึกษาค่าความดันตกคร่อมของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก

2.3.1 วิธีการศึกษา ที่ม่นักวิจัยเลือกปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 2 ปัจจัย ประกอบด้วย

ปัจจัยที่ 1 คือ อัตราการไหลของก๊าซ หรืออัตราการไหลของพัดลมซึ่งในการทดสอบจะใช้ระดับของอัตราการไหลของก๊าซ 3 ระดับคือ 272 218 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (CFM)

ปัจจัยที่ 2 คือ อัตราการไหลของน้ำปูนใส หรืออัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งในการทดสอบจะใช้ระดับของอัตราการไหลของน้ำปูนใส 3 ระดับคือ 50 60 และ 70 ลิตรต่อนาที (LPM)

2.3.2 ผลการศึกษาและวิจารณ์

ความดันตกคร่อมภายในหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก มีลักษณะที่แตกต่างจากความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นในการไหลของอากาศภายในห้องรม (Single phase flow) ซึ่งเคยรายงานผลการศึกษามาแล้ว โดย จักรพงษ์และคณะ, 2550 สำหรับการหาความดันตกคร่อมภายในหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกจะพบว่าเป็นการไหลแบบ 2 ทิศทาง (Two phase flow) คือทิศของกระแสก๊าซ และทิศของกระแส น้ำ (Nasseh et al., 2009) ซึ่งสวนทางกันเป็นผลทำให้ความดันตกคร่อมต่ำลง โดยผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Bandyopadhyay et al., 2007, Brogren et al., 1997) ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 4 ซึ่งทางทีมผู้วิจัยจะนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมภายในหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก

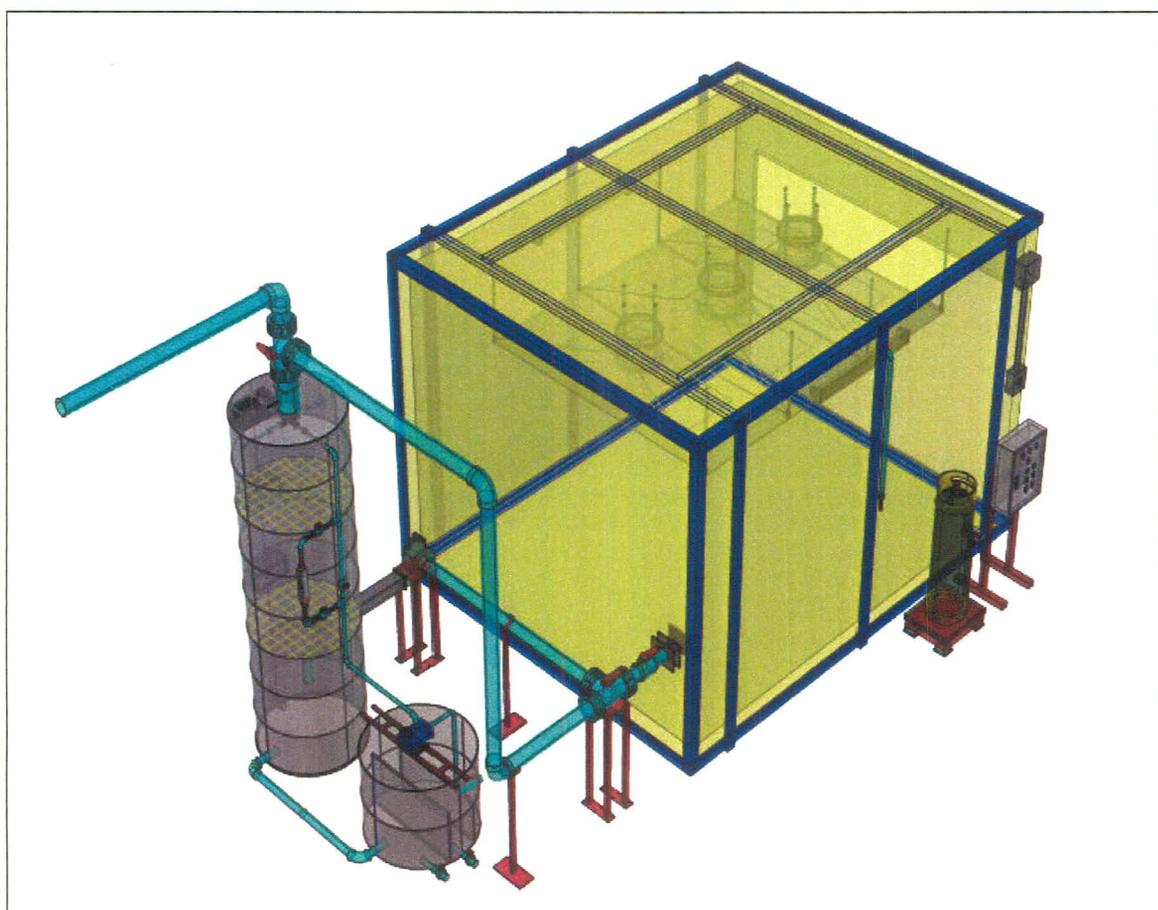
อัตราการไหลของ ก๊าซ (CFM)	อัตราการไหลของ น้ำปูนใส (LPM)	ความเร็วทางเข้า (m/s)	อัตราการไหล (m ³ /s)	ความดันตกคร่อม (Pa)
165	50	6.6	0.120	69.5
	60	6.7	0.122	60.5
	70	6.9	0.125	51.0
218	50	8.9	0.162	202.5
	60	9.2	0.167	180.0
	70	9.4	0.171	162.0
272	50	10.3	0.187	361.0
	60	10.6	0.192	340.5
	70	11.0	0.200	320.5

กิจกรรมที่ 3 การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของหอบำบัดแบบระบบไม่หมุนเวียนการบำบัด

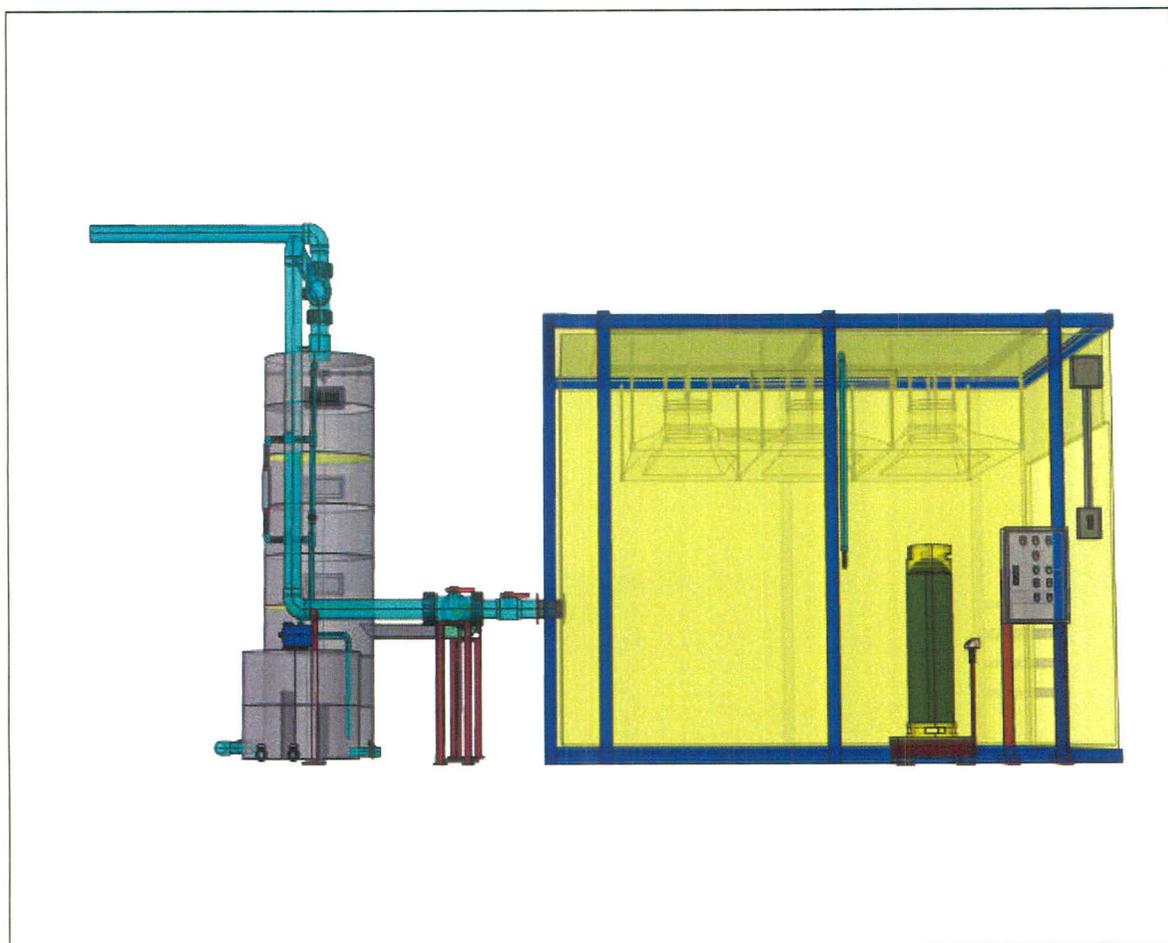
ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมของหอบำบัดที่เป็นระบบไม่หมุนเวียนการบำบัด (แบบปกติ) และนำไปใช้ต่อยอดกับแบบหมุนเวียนการบำบัดซึ่งจะพัฒนาแนวทางที่เหมาะสมนำมาใช้ในอนาคต โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมก่อนทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบไม่หมุนเวียนการบำบัด

ในการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกจะใช้ห้องรมาตรฐานของจักรพงษ์และคณะ, 2553 ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27 ซึ่งมีขนาดห้อง 3x4.2x3 เมตร ตัวโครงสร้างเป็นหลักและระบบผนังห้องกันการรั่วซึมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภายในมีระบบพัดลมแบบบังคับอากาศในแนวตั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเอาไว้ใช้หมุนเวียนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในห้องก่อนทำการบำบัด ทางด้านข้างเป็นระบบจ่ายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากถังอัดแรงดันเข้มข้นซึ่งสะดวกในการดำเนินงานเพราะใช้ตาชั่งไฟฟ้าวัดน้ำหนัก และประมาณค่าโดยการคำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นได้ ด้านหลังต่อเข้ากับระบบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกที่สร้างเอาไว้แล้ว

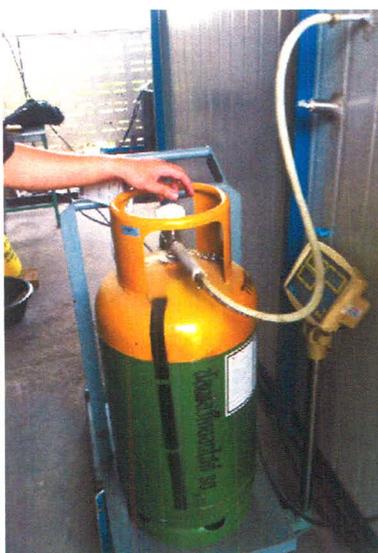


ภาพที่ 26 หอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก



ภาพที่ 27 หอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก (ต่อ)

ในการทดสอบการทำงานของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเลือกทดสอบประสิทธิภาพของหอบำบัดก๊าซด้วยตัวแปร 2 ตัว คือ อัตราการไหลของก๊าซ (Flow) และอัตราการไหลของน้ำปูนใส (Feed) ตัวแปรละ 3 ระดับ โดยใช้ขนาดของพัดลม 2.0 แรงม้าซึ่งมีอัตราการไหลของก๊าซ (Flow) เท่ากับ 165 218 และ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ซึ่งค่า 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีได้มาจากการตรวจวัดอัตราการไหลของพัดลมจริงในระบบส่วนค่าลดลงเนื่องจากประสิทธิภาพของห่อจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซลดลง) ส่วนเครื่องสูบน้ำขนาด 1.0 แรงม้าที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส (Feed) เท่ากับ 50 60 และ 70 ลิตรต่อนาที (ซึ่งค่า 50 ลิตรต่อนาทีได้มาจากการคำนวณที่อัตราการไหลของพัดลมจริงในระบบ ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพของห่อจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้น) โดยทำการศึกษาระดับตัวแปรที่เหมาะสม ด้วยระบบแบบไม่มีการหมุนเวียนการบำบัด ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 28 และ 32 เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมก่อนจะทำการศึกษาระบบหมุนเวียนการบำบัด โดยผลการทดสอบระบบแบบไม่หมุนเวียนการบำบัด (แบบปกติ) ถูกแสดงในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 28 การประมาณค่าโดยการคำนวณความเข้มข้นเริ่มต้น



ภาพที่ 29 การปรับอัตราการไหลของพัดลม



ภาพที่ 30 พัดลมขนาด 2.0 แรงม้า ที่ใช้กับหอบำบัด



ภาพที่ 31 การปรับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ



ภาพที่ 32 เครื่องสูบน้ำขนาด 1.0 แรงม้า ที่ใช้กับหอบำบัด

ทำการออกแบบการทดลองตามระเบียบวิธีที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k และทำการทดสอบปัจจัย 2 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของก๊าซ (Flow) และอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส (Feed) อย่างละ 3 ระดับ โดยการศึกษาทดลองนี้เป็นการทดลองร่วมปัจจัย $3^2 = 9$ การทดลอง ดังแสดงในตารางผลการทดสอบที่ 5 ถึง 13 สำหรับตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย

- เวลาที่ใช้บำบัดก๊าซ SO_2	30 – 40	นาที
- ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม	5.000	ส่วนในล้านส่วน
- ปริมาณปุ๋นขาวที่ใช้	0.8	กิโลกรัม
- ความสูงของชั้นตัวกลาง	120	เซนติเมตร
- ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการบำบัด	60 – 500	ส่วนในล้านส่วน

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซ (Flow) อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส (Feed) เปลี่ยนแปลง

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของหอบำบัดจากการเทียบความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่างทางเข้าและทางออก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา จักขยพงษ์และคณะ, 2553 ได้ใช้วิธีการตรวจวัด 3 แบบคือใช้การไตเตรทสารเคมีในช่วงความเข้มข้นสูงมาก (เกิน 10,000 ppm), (สดศรี เนียมเปรม, 2535) ใช้เครื่องวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นปานกลาง (5,000 - 10,000 ppm) และใช้การชักตัวอย่างแบบรวดเร็วด้วย Dosimeter tube ในช่วงความเข้มข้นต่ำมาก (น้อยกว่า 250 ppm) ซึ่งพบว่าการตรวจวัดแบบการไตเตรทสารเคมีมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก ส่วนการตรวจวัดแบบการชักตัวอย่างนั้นใช้ต้นทุนสูงมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะใช้เฉพาะเครื่องวัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Testo 340) โดยผลการทดสอบตามระเบียบวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ผลการศึกษาถูกแสดงดังในตารางที่ 5 ถึง 13

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส 50 ลิตรต่อ นาที และอัตราการไหลของก๊าซ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	1957	60.86	
5	1945	709	63.55	
10	1283	478	62.74	
15	722	288	60.11	
20	507	199	60.75	58.83
25	341	147	56.89	
30	190	85	55.26	
35	115	57	50.43	
40	68	ns		98.64

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส 50 ลิตรต่อ นาที และอัตราการไหลของก๊าซ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	2256	54.88	
5	2901	1311	54.81	
10	1432	680	52.51	
15	707	353	50.07	51.18
20	358	186	48.04	
25	182	92	49.45	
30	99	51	48.48	
35	43	ns		99.14

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 50 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	2536	49.28	
5	2830	1483	47.60	
10	1352	716	47.04	
15	618	316	48.87	46.64
20	389	216	44.47	
25	193	108	44.04	
30	104	57	45.19	
35	48	ns		99.04

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 60 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	1905	61.90	
5	2268	808	64.37	
10	1178	413	64.94	
15	751	293	60.99	60.67
20	493	189	61.66	
25	327	135	58.72	
30	167	71	57.49	
35	94	42	55.32	
40	64	ns		98.72

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 60 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	2082	58.36	
5	2525	1084	57.07	
10	1205	523	56.60	
15	582	262	54.98	55.49
20	313	141	54.95	
25	160	73	54.38	
30	94	45	52.13	
35	41	ns		99.18

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 60 ลิตร ต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	2407	51.86	
5	2739	1394	49.11	
10	1273	648	49.10	
15	537	279	48.04	48.88
20	384	198	48.44	
25	239	127	46.86	
30	119	61	48.74	
35	64	ns		98.72

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 70 ลิตร ต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	1506	69.88	
5	2240	775	65.40	
10	1338	467	65.10	
15	726	295	59.37	
20	458	169	63.10	63.11
25	296	105	64.53	
30	183	73	60.11	
35	101	43	57.43	
40	58	ns		98.84

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 70 ลิตร ต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพบำบัด เฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	1993	60.14	
5	2683	1032	61.54	
10	1372	547	60.13	
15	638	253	60.34	58.51
20	419	173	58.71	
25	192	89	53.65	
30	118	53	55.08	
35	63	ns		98.74

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อัตราการไหลของน้ำปูนใส 70 ลิตร ต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

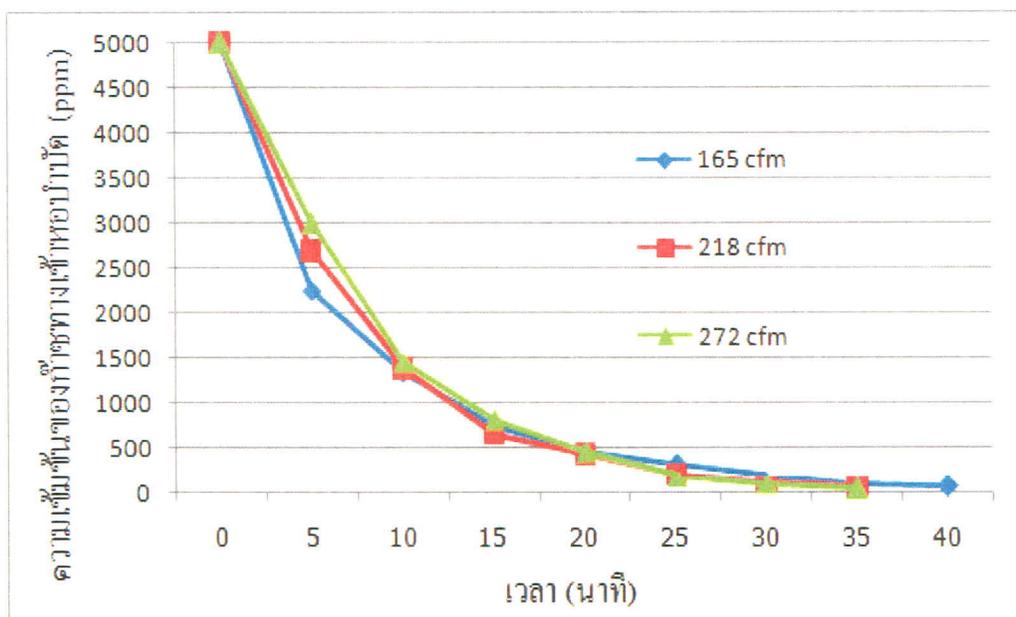
เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย/เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	2283	54.34	
5	2993	1447	51.65	
10	1463	721	50.72	
15	807	398	50.68	50.40
20	454	231	49.12	
25	178	89	50.00	
30	95	51	46.32	
35	39	ns		99.22

3.2.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดกับเวลาในการบำบัดเมื่ออัตราการไหลของน้ำปูนใสคงที่ และอัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลง

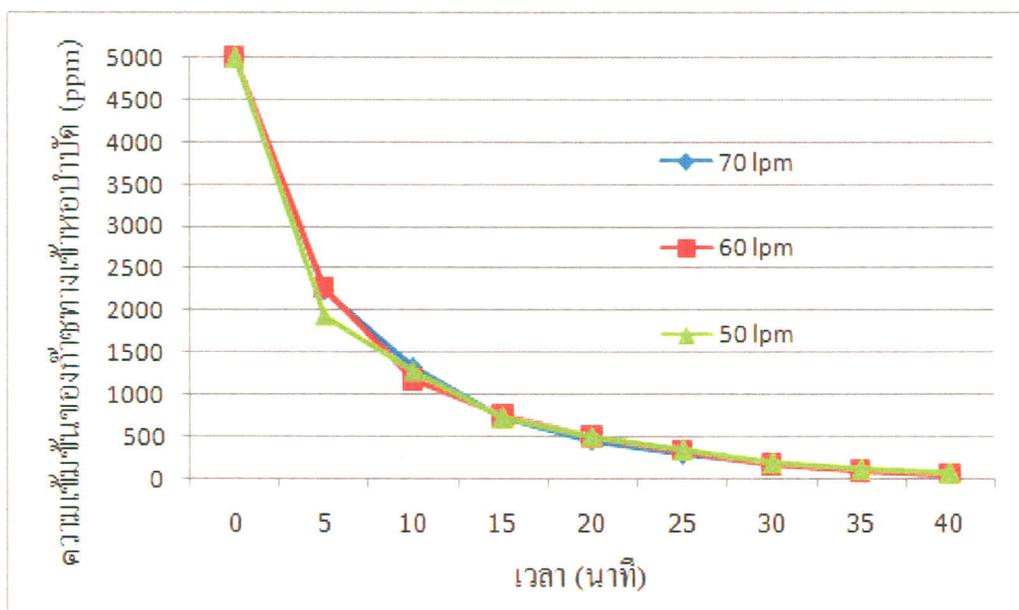
จากภาพที่ 33 แสดงผลการทดสอบโดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำปูนใสคงที่ ในระดับ 70 ลิตรต่อ นาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ 3 ระดับ ที่ 165 218 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์กราฟที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตำแหน่งทางเข้าหอบำบัด จะมีค่าลดลง จนถึงที่ระดับค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่กำหนดไว้คือ 60 ppm เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ต้องการใช้เปรียบเทียบเพื่อหาความสามารถในการบำบัดที่แตกต่างกัน ส่วนประสิทธิภาพของหอบำบัดใช้การคำนวณเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นทางเข้ากับทางออกที่เวลาเดียวกัน ผลที่ได้พบว่าเมื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำปูนใสคงที่ แล้วทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ ค่าความเข้มข้นของก๊าซจะมีค่าค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลาในการบำบัด ซึ่งถ้าเปรียบเทียบโดยใช้ค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ จะพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซลดลงจะมีแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ยสูงขึ้น แต่ใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น่าจะมีผลมาจากการที่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซลดลงจะส่งผลทำให้เกิดการถ่วงเวลาในการไหลของก๊าซให้ไหลช้าตรงบริเวณวัดสุตัวกรอง ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับน้ำปูนใสได้นานขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของหอบำบัดจึงสูง ในขณะที่เดียวกันก็ใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย

3.2.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดกับเวลาในการบำบัดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซคงที่ และอัตราการไหลของน้ำปูนใสเปลี่ยนแปลง

เมื่อวิเคราะห์ผลของอัตราการไหลของก๊าซคงที่ ในระดับ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำปูนใส 3 ระดับที่ 50 60 70 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์กราฟเปรียบเทียบจะพบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางเข้าหอบำบัดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการบำบัด แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดไม่มีความแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 33 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ ที่อัตราการไหลต่างๆ ของก๊าซ และอัตราการไหลของน้ำปูนใสคงที่ 70 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 34 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ ที่อัตราการไหลต่างๆ ของน้ำปูนใส และอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

3.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติเมื่ออัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของน้ำปุ๋น ใส่เปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 15.0 for windows evaluation version โดยทำการวิเคราะห์สถิติจากข้อมูลที่เก็บมาจากหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการวิเคราะห์ตัวแปรอัตราการไหลของก๊าซ (Flow) และอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่ (Feed) ซึ่งเป็นตัวแปรต้นกับค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ย (Average efficiency) และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด (Time) ซึ่งเป็นตัวแปรตามดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ย และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่ออัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่เปลี่ยนแปลง

อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่	50 ลิตรต่อนาที	60 ลิตรต่อนาที	70 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของก๊าซ			
165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	58.83%±1.076 ^{a,A}	60.67%±1.076 ^{a,b,A}	63.11%±1.076 ^{b,A}
	40 นาที	40 นาที	40 นาที
218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	51.18%±1.150 ^{a,B}	55.49%±1.150 ^{b,B}	58.51%±1.150 ^{c,B}
	35 นาที	35 นาที	35 นาที
272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	46.64%±1.150 ^{a,C}	48.88%±1.150 ^{a,b,C}	50.4%±1.150 ^{b,C}
	35 นาที	35 นาที	35 นาที

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแต่ละแถวที่มีตัวอักษรพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ และค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

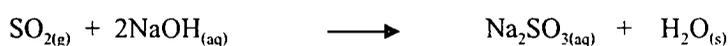
เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ย โดยวิธีความแตกต่างนัยสำคัญน้อยสุด (Least Significant Difference, LSD) พบว่าปัจจัยร่วม (Interaction) ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ส่วนปัจจัยเดียวนั้นมีความแตกต่างกันในทางสถิติจึงนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซคงที่จะมีค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ยที่ต่างกันและไม่แตกต่างกัน ส่วนที่อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่คงที่ค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ยแตกต่างกันทั้งหมด จากผลการศึกษพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจะช่วยลดระยะเวลาในการบำบัดลงได้ ในขณะที่อัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่เพิ่มขึ้นแต่ไม่สามารถช่วยลดระยะเวลาในการบำบัดลงได้ อย่างไรก็ตามผลของค่าประสิทธิภาพของหอบำบัดเฉลี่ยที่สูงที่สุดจากศึกษาคือที่อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำปุ๋นใส่เท่ากับ 70 ลิตรต่อ นาที ซึ่งน่าจะเป็นสถานะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อเปลี่ยนแปลงสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

การคำนวณหาปริมาณปูนขาวในระบบ Lime Slurry Scrubbing ที่ใช้สำหรับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกแสดงในรายการคำนวณในหัวข้อที่ 1.1 ขั้นตอนที่ (5) ซึ่งสามารถหาปริมาณปูนขาวที่ต้องใช้ในแต่ละระดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อสิ้นสุดการรวม ส่วนการคำนวณหาปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ในระบบ Sodium Base Scrubbing นั้นสามารถคำนวณได้เช่นกันดังนี้

การคำนวณหาปริมาณน้ำโซดาไฟที่ใช้สำหรับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

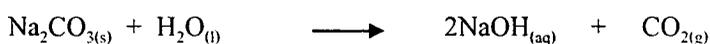
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่หอบำบัด



อัตราส่วนโดยโมลของน้ำโซดาไฟต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

$$\frac{2\text{NaOH}}{\text{SO}_2} = \frac{80}{64} = 1.25$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ถังเตรียมน้ำโซดาไฟ



อัตราส่วนโดยโมลของน้ำโซดาไฟต่อสาร โซเดียมคาร์บอเนต

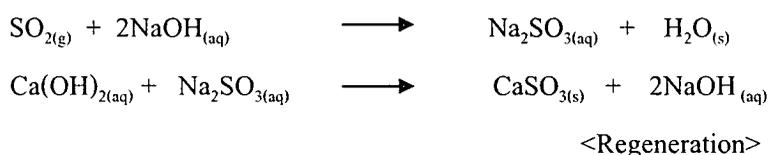
$$\frac{2\text{NaOH}}{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{80}{106} = 0.755$$

ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมคาร์บอเนต ต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ $1.25 / 0.755 = 1.66$

แสดงว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) = $1.66 \times 3,433.093 = 5,699$ กรัม หรือประมาณ 5.7 กิโลกรัม

ในทำนองเดียวกันถ้าใช้ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศเมื่อสิ้นสุดการรวมเป็น 15,000, 10,000 และ 5,000 ppm จะต้องใช้ปริมาณปูนขาวประมาณเท่ากับ 4.2, 2.8 และ 1.4 กิโลกรัมตามลำดับ

ส่วนการคำนวณหาปริมาณน้ำโซดาไฟและน้ำปูนใสที่ใช้สำหรับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในระบบ Double Alkali หรือระบบค่างู๊กี้ใช้หลักการเช่นเดิม ซึ่งมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่หอบำบัดเป็น

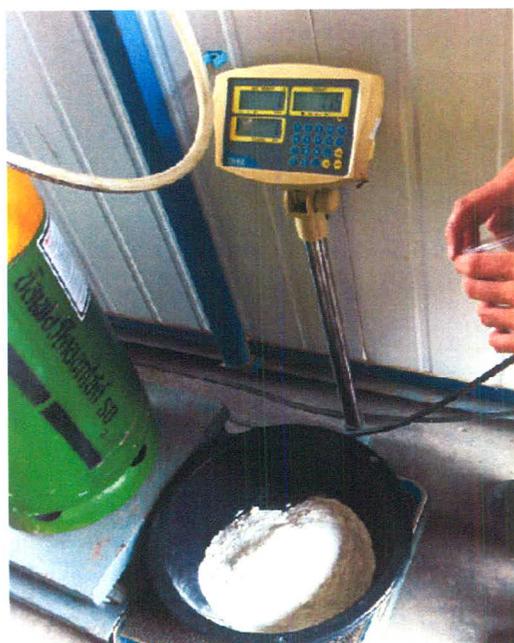


โดยปริมาณสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทุกระบบถูกแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงปริมาณสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหน่วยกิโลกรัม

ระดับความเข้มข้นหลังการรวม	5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm	20,000 ppm
สารละลายในการดูดซับ				
ปูนขาว	0.8	1.5	2.2	3.0
Lime Slurry Scrubbing				
โซเดียมคาร์บอเนต	1.4	2.8	4.2	5.7
Sodium Base Scrubbing				
ปูนขาวกับโซเดียมคาร์บอเนต	0.8/1.4	1.5/2.8	2.2/4.2	3.0/5.7
Double Alkali				

ขั้นตอนในการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแต่ละระบบมีลักษณะเหมือนกันคือ การชั่งน้ำหนักสารตามสัดส่วนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่จะใช้ และทำการผสมในถังเตรียม ซึ่งจะเป็นบ่อผสมและพักสารละลายก่อนใช้หมุนเวียนในระบบดังแสดงในภาพที่ 35 สำหรับปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับหมุนเวียนภายในหอสามารถทำการปรับระดับสมดุลได้จากการหมุนเวียนน้ำในระบบ สำหรับบ่อผสมถูกออกแบบให้มี 3 ส่วนโดยใช้บ่อซีเมนต์ที่มีขนาดเท่ากับหอบำบัดและต่อกันเป็น 2 ชั้น แบ่งระดับความสูงของบ่อผสมให้ต่างกันเพื่อให้สารละลายที่ดูดซับก๊าซแล้วตกตะกอนแยกออกมาได้ทางท่อระบายด้านล่าง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตรวจค่าความเป็นกรดต่างได้สะดวก



ภาพที่ 35 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

3.3.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ในการศึกษาเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะศึกษา 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยแรกศึกษาชนิดของสารละลาย 4 ระบบ ซึ่งประกอบด้วย น้ำโซดาไฟ น้ำปูนใส น้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส และน้ำ ปัจจัยที่สองศึกษาระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 3 ระดับคือ 5,000 10,000 และ 15,000 ppm (เนื่องจากเครื่องมือวัดมีข้อจำกัดในช่วงการเก็บข้อมูลจึงไม่สามารถศึกษาที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 20,000 ppm ได้) ผลการศึกษาถูกแสดงดังในตารางที่ 16 ถึง 27

เนื่องในหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั่วๆ ไปใช้ระบบสารละลายในการดูดซับเป็นน้ำปูนใสซึ่งมักมีปัญหาสำคัญในการใช้งานคือ ระบบการหมุนเวียนมักอุดตันได้ง่าย โดยเฉพาะในชั้นตัวกรอง และหัวฉีดน้ำ บางครั้งถ้าปิดการใช้งานไปนานเครื่องสูบน้ำอาจเกิดการอุดตันด้วย นอกจากนี้น้ำทิ้งจากหอบำบัดยังเป็นน้ำเสียที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผู้ประกอบการส่วนใหญ่มักละเลยการดูแล

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟ

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO_2 (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	5000	2300	54.00	
5	1856	1273	31.41	
10	1294	854	34.00	
15	647	302	53.32	40.43
20	419	312	25.54	
25	279	154	44.80	
30	146	83	43.15	
35	86	54	37.21	
40	43			99.14

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำปูนใส

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO_2 (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	5000	1506	69.88	
5	2240	775	65.40	
10	1338	467	65.10	
15	726	295	59.37	63.11
20	458	169	63.10	
25	296	105	64.53	
30	183	73	60.11	
35	101	43	57.43	
40	58	ns		98.84

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	5000	1707	65.86	
5	2385	849	64.40	
10	1389	486	65.01	
15	746	282	62.20	
20	417	157	62.35	63.69
25	235	84	64.26	
30	132	61	53.79	
35	74	21	71.62	
40	39			99.22

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำ

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	5000	3047	39.06	
5	2781	1558	43.98	
10	1600	802	49.88	
15	789	453	42.59	
20	446	233	47.76	39.40
25	243	147	39.51	
30	138	95	31.16	
35	80	63	21.25	
40	44			99.12

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 10,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟ

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	10000	6234	37.66	
5	4430	3502	20.95	
10	3729	1134	69.59	
15	1745	739	57.65	
20	951	519	45.43	42.45
25	563	244	56.66	
30	224	173	22.77	
35	154	105	31.82	
40	86	52	39.53	
45	60			99.40

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 10,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำปูนใส

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	10000	4332	56.68	
5	4823	2541	47.31	
10	3829	1184	69.08	
15	1931	805	58.31	
20	851	501	41.13	51.15
25	653	259	60.34	
30	263	161	38.78	
35	184	112	39.13	
40	115	58.00	49.57	
45	60			99.40

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 10,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	10000	4390	56.10	
5	4721	2398	49.21	
10	3612	846	76.58	
15	1697	570	66.41	
20	880	404	54.09	51.87
25	493	164	66.73	
30	226	130	42.48	
35	132	76	42.42	
40	78	68	12.82	
45	60			99.40

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 10,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำ

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	10000	4687	53.13	
5	4026	3243	19.45	
10	3958	2510	36.58	
15	2190	1522	30.50	
20	1293	963	25.52	
25	779	680	12.71	25.37
30	445	410	7.87	
35	342	303	11.40	
40	269	211	21.56	
45	207	179	13.53	
50	186	99	46.77	
55	60			99.40

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 15,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟ

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด	ประสิทธิภาพบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	15000	6559	56.27	
5	6419	5916	7.84	
10	4473	3240	27.57	
15	3937	2036	48.29	
20	2270	1283	43.48	
25	1681	854	49.20	44.70
30	836	309	63.04	
35	514	271	47.28	
40	323	140	56.66	
45	161	85	47.20	
50	98	54	44.90	
55	57			99.62

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 15,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำปูนใส

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด	ประสิทธิภาพบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	15000	6325	57.83	
5	6912	4019	41.85	
10	4737	2773	41.46	
15	3791	2008	47.03	
20	2166	1268	41.46	
25	1596	773	51.57	48.31
30	759	288	62.06	
35	475	241	49.26	
40	286	117	59.09	
45	137	92	32.85	
50	100	53	47.00	
55	59			99.61

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 15,000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส

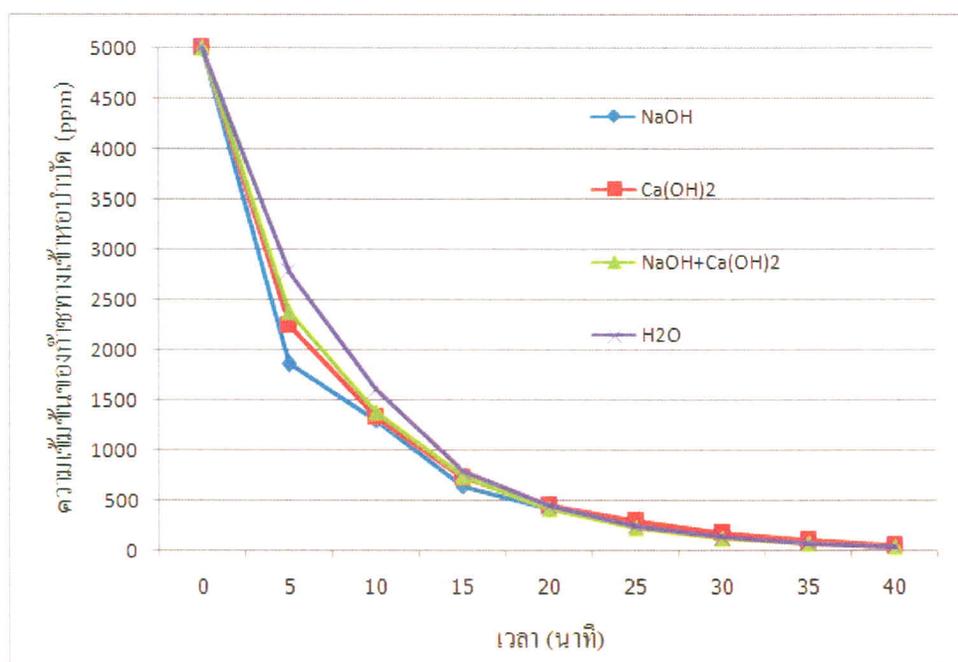
เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพบำบัด	ประสิทธิภาพบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	15000	6457	56.95	
5	4975	2877	42.17	
10	4126	1667	59.60	
15	3390	1458	56.99	
20	1956	1055	46.06	
25	1249	691	44.68	50.93
30	748	370	50.53	
35	422	225	46.68	
40	263	113	57.03	
45	156	78	50.00	
50	97	49	49.48	
55	55			99.63

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 15.000 ppm ด้วยสารละลายเป็นน้ำ

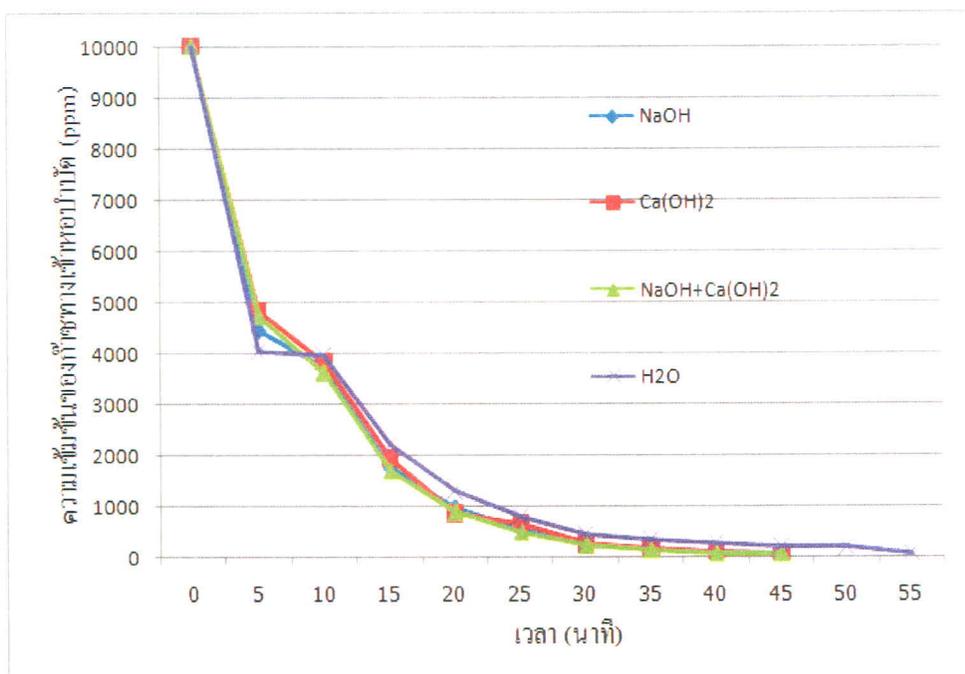
เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด	ประสิทธิภาพหอบำบัด
	ขาเข้า	ขาออก	เวลาใดๆ (%)	ณ เวลาสิ้นสุด (%)
0	15000	9723	35.18	
5	6501	4803	26.12	
10	4148	3808	8.20	
15	3449	2340	32.15	
20	2525	1813	28.20	
25	1918	1475	23.10	
30	1180	996	15.59	24.03
35	728	705	3.16	
40	493	492	0.20	
45	344	257	25.29	
50	252	145	42.46	
55	191	98	48.69	
60	54			99.64

3.3.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวมคงที่

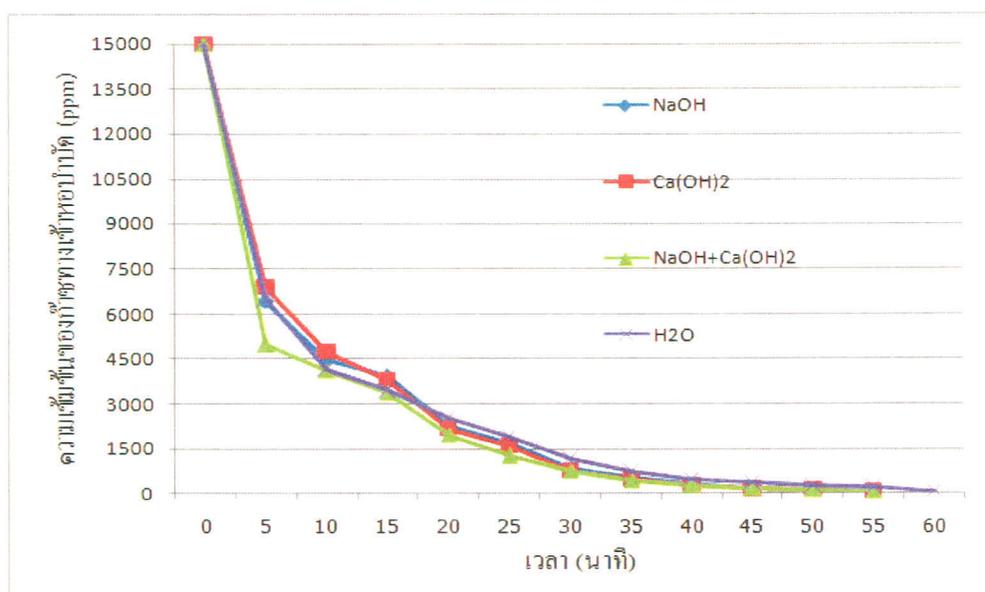
จากผลการศึกษาเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่แตกต่างกันในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถนำเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อกำหนดระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวมคงที่ดังแสดงในภาพที่ 36 ถึง 38



ภาพที่ 36 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ เมื่อสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5.000 ppm



ภาพที่ 37 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ เมื่อสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 10,000 ppm



ภาพที่ 38 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ เมื่อสารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 15,000 ppm

จากกราฟเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวมคั้งที่ต่างๆ พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ มีแนวโน้มลดลง โดยสารละลายในระบบที่เป็นน้ำมีแนวโน้มในการใช้เวลาบำบัดสูงขึ้นและมีค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยต่ำสุด จากการศึกษาพบว่าสารละลายด่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบแบบเดิมที่ใช้น้ำปูนใส

3.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อใช้สารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการเปลี่ยนแปลง

จากผลการศึกษาเมื่อใช้สารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 28 พบว่าเกือบทุกสารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรรมสูงมากขึ้นจะมีความสามารถในการบำบัดลดลง กล่าวคือประสิทธิภาพลดลง และใช้เวลามากขึ้น โดยทุกการทดสอบใช้เกณฑ์เดียวกันคือ บำบัดจนมีความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรรมที่ทางเข้าน้อยกว่า 60 ppm

ตารางที่ 28 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่อสารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรรมเปลี่ยนแปลง

ระดับความเข้มข้นหลังการรรม	5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
สารละลายที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ			
น้ำโซดาไฟ	40.43%±4.356 ^{a,A}	42.45%±4.107 ^{b,B}	44.70%±3.715 ^{c,B}
	40 นาที	45 นาที	55 นาที
น้ำปูนใส	63.11%±4.356 ^{b,B}	51.15%±4.107 ^{a,B}	48.31%±3.7150 ^{a,B}
	40 นาที	45 นาที	55 นาที
น้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส	63.69%±4.356 ^{b,B}	51.87%±4.107 ^{a,B}	50.93%±3.7150 ^{a,B}
	40 นาที	45 นาที	55 นาที
น้ำ	39.40%±4.356 ^{b,A}	25.37%±3.715 ^{a,A}	24.03%±3.557 ^{a,A}
	40 นาที	55 นาที	60 นาที

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแต่ละแถวที่มีตัวอักษรพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ และค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรพิมพ์ใหญ่กำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

โดยผลการศึกษาทางสถิติพบว่าในส่วนที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรรมคงที่ เมื่อใช้สารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนไปจะพบว่ามีทั้งแตกต่าง และไม่แตกต่างกันในทางสถิติ แต่ประเด็นสำคัญของผลที่ได้คือ เมื่อใช้สารละลายเป็นน้ำปูนใส หรือน้ำโซดาไฟและน้ำปูนใส จะแตกต่างและดีกว่าน้ำโซดาไฟ และน้ำมากเนื่องจากมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาทางเคมีสูงกว่า ในขณะที่เมื่อใช้สารละลายทั้งน้ำปูนใส หรือน้ำโซดาไฟและน้ำปูนใสจะไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ซึ่งหมายความว่าสามารถเลือกใช้ระบบใดก็ได้ เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดไม่

ต่างกัน แต่ถ้าวิเคราะห์องค์ประกอบอื่น ๆ ในเรื่องราคา การใช้งานของระบบ และสิ่งแวดล้อมแล้วจะพบว่า มีประเด็นที่สำคัญในการพิจารณาต่อไปนี้

ประเด็นที่ 1 เรื่องราคา สำหรับระบบสารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบน้ำปูนใส หรือระบบ Lime slurry scrubbing หรือระบบเดิมที่ใช้กันอยู่พบว่า เกิดจากการใช้ปูนขาว (Lime or CaO) ละลายในน้ำได้เป็นน้ำปูนใส (Calcium hydroxide or $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีราคาตามท้องตลาดประมาณกิโลกรัมละ 5-8 บาท ส่วนระบบ Sodium base scrubbing เกิดจากการใช้สารประเภทโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ละลายในน้ำได้เป็นน้ำโซดาไฟ (Sodium hydroxide or NaOH) ซึ่งมีราคาประมาณกิโลกรัมละ 22-25 บาท ซึ่งสูงกว่าปูนขาวประมาณ 4 เท่า ดังนั้นต้นทุนในเรื่องการเตรียมสารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงสูงกว่ามาก และในระบบสารละลายต่างคู่ก็จะมีราคาสูงขึ้นไปอีกเพราะใช้สารละลายทั้ง 2 แบบ

ประเด็นที่ 2 เรื่องการใช้งานของระบบ สำหรับในระบบสารละลายที่ใช้น้ำปูนใส จะพบว่าเมื่อใช้งานไปแล้วระบบจะเกิดสารยิปซัม (Gypsum or Calcium sulfate) ซึ่งตกตะกอนออกมาที่ก้นบ่อของหอบำบัด แต่ก็ยังมีตะกอนตกค้างในระบบ คือตกค้างในชั้นตัวกรอง ที่หัวฉีด และข้อต่อต่าง ๆ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลง ส่วนระบบสารละลายที่ใช้น้ำโซดาไฟ ไม่มีตะกอนอุดตันแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่า

ประเด็นที่ 3 เรื่องสิ่งแวดล้อม สำหรับในระบบ Lime slurry scrubbing หรือระบบเดิมที่ใช้กันอยู่พบว่าเมื่อพิจารณาในส่วนองน้ำทิ้งจะเกิดสภาพเป็นกรด เนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพของสารละลายจนเป็นสารละลายเกลือ (Calcium sulfite or CaSO_3) ซึ่งยากต่อการบำบัดก่อนปล่อยทิ้ง ในขณะที่ระบบ Sodium base scrubbing หรือน้ำโซดาไฟอย่างเดียวก็ไม่เหมาะสมเพราะในส่วนองน้ำทิ้งจะเกิดสภาพเป็นกรด เนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพของสารละลายจนเป็นสารละลายเกลือ (Sodium sulfite or Na_2SO_3) ซึ่งยากต่อการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งเช่นกัน แต่ถ้าใช้ระบบต่างคู่ หรือระบบ Double alkali นั้นพบว่ามีหลักการทำงานคือใช้สารละลายน้ำโซดาไฟอย่างเดียวหมุนเวียนภายในหอบำบัดซึ่งไม่เกิดการอุดตัน จากนั้นจึงทำให้เกิดการตกตะกอนนอกหอบำบัดด้วยสารละลายที่ใช้น้ำปูนใสซึ่งนอกจากจะสามารถแยกการตกตะกอน ทำให้สามารถทำการเก็บกากตะกอนแยกออกมาได้แล้ว สารละลายที่ยังเหลือค้างในถังตกตะกอนยังสามารถนำกลับมาใช้ต่อได้ เนื่องจากยังเป็นสารละลายน้ำโซดาไฟซึ่งถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ได้อีกครั้งในหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งไม่ต้องระบายน้ำทิ้ง

ดังนั้นสำหรับการศึกษาถัดไปในเรื่องการศึกษามหาบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบหมุนเวียนการบำบัด ทางทีมผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระบบสารละลายระบบต่างคู่ ซึ่งเป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน

3.4 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบไม่หมุนเวียนการบำบัด

โดยจากผลการศึกษาที่ผ่านมาทางทีมผู้วิจัยได้พยายามพัฒนากระบวนการของห้องรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (จักรพงษ์และคณะ, 2554) และพยายามนำไปเผยแพร่แก่เกษตรกรที่ประกอบอาชีพปลูกลำไย รวมทั้งผู้ประกอบการส่งออกลำไยสด ทั้งในส่วนของการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับภายในห้องรม การใช้ระบบจ่ายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้นจากถังอัดแรงโดยตรง และการสร้างหอบำบัดให้ได้มาตรฐาน โดยเลือกใช้งานที่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียก เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงาน และได้มาตรฐานในการส่งออกที่มีคุณภาพ

สำหรับการออกแบบและคำนวณทางวิศวกรรม (Coulson et al., 1991, Ibarz et al., 2003, Parry et al., 1999, Peters et al., 1991, Schnelle et al., 2003) ของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกด้วยระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดที่ผ่านมาสามารถวิเคราะห์ห้วงคร่าวได้ว่าปัจจัยที่ควบคุมไว้ตั้งแต่ตอนออกแบบทางวิศวกรรมคือ พื้นที่หน้าตัดของหอบำบัด และความสูงของชั้นตัวกลางภายในหอบำบัด ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้บ่อยๆ ในขณะที่ปฏิบัติงาน ปัจจัยดังกล่าวถูกออกแบบไว้สำหรับให้สามารถกำจัดหรือลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ในเวลาที่เหมาะสมกับขนาดห้องที่บรรจุลำไยสดที่ใช้งาน ส่วนปัจจัยที่ต้องทำการหาสภาวะในขณะที่ใช้งานคืออัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการไหลของน้ำปูนใส เนื่องจากผลการคำนวณทางวิศวกรรมดังกล่าวเป็นการคำนวณเพียงเพื่อหาขนาดในช่วงการใช้งานที่เหมาะสมเท่านั้น ในส่วนของ การก่อสร้างและเลือกซื้ออุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ และเครื่องสูบน้ำนั้นจะต้องเลือกขนาดให้สูงกว่าช่วงการใช้งานที่ต้องการ ดังนั้นในการปฏิบัติงานจริงจะต้องทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

อย่างไรก็ตามทีมผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้แล้วพบว่าการใช้หอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบไม่หมุนเวียนการบำบัดนั้นจะทำให้ในช่วงแรกของการบำบัด (10 นาทีแรก) ยังคงปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดคืออยู่ในช่วง 500-2,500 ppm (ถ้าใช้ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm) ถึงแม้จะใช้การออกแบบและหาสภาวะใช้งานที่ดีที่สุดแล้วก็ตาม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการบำบัดจึงน่าจะเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ดีที่สุด

นอกจากนี้ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบที่ผ่านมากับระบบที่ใช้อัตราการไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มากที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิในตอนรายงานความก้าวหน้า ซึ่งพบว่าระบบดังกล่าวนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยให้สูงขึ้นได้ไม่มาก แต่เวลาที่ใช้ในการบำบัดสูงมากกว่าระบบปกติเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์

กิจกรรมที่ 4 การทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมของหอบำบัดแบบระบบหมุนเวียนการบำบัด

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมของหอบำบัดที่เป็นระบบหมุนเวียนการบำบัด (แบบพัฒนาใหม่) ซึ่งจะพัฒนาแนวทางที่เหมาะสมนำมาใช้ในอนาคต โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

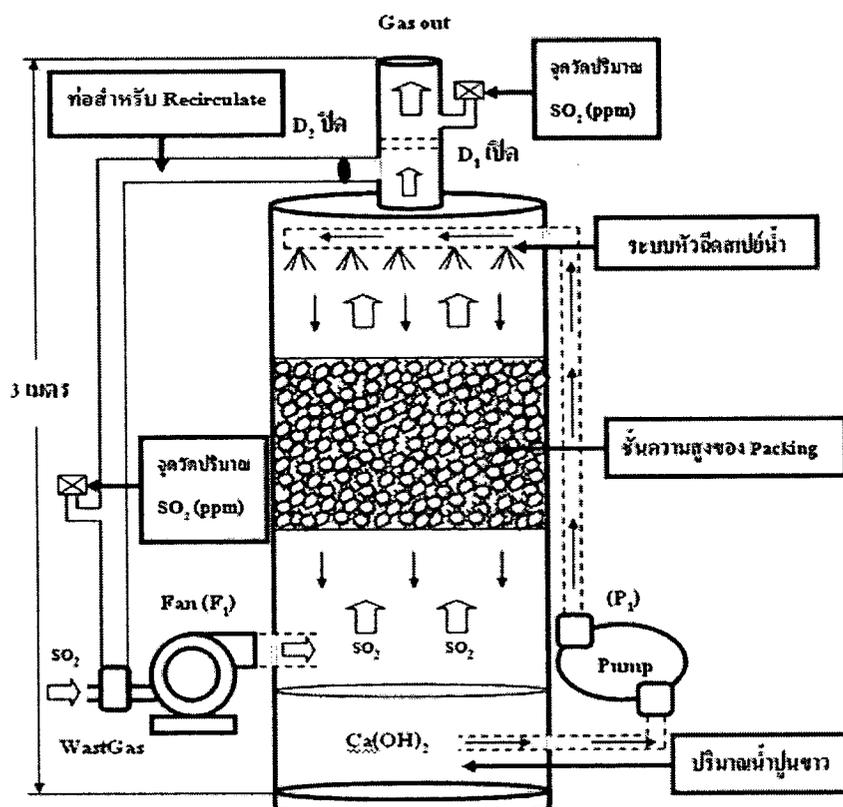
4.1 ขั้นตอนการเตรียมก่อนทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบหมุนเวียนการบำบัด

โดยหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบหมุนเวียนการบำบัดมีหลักการทำงานดังแสดงในภาพที่ 39 และ 40 คือการหมุนเวียนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากห้องรมซึ่งจะทำการดูดเข้ามายังระบบ (Suction) ตามปริมาตรที่กำหนดแล้วทำการหมุนวนซ้ำเพื่อบำบัด (Recirculated) จนมีค่าความเข้มข้นต่ำถึงระดับ 60 ppm แล้วจึงปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม

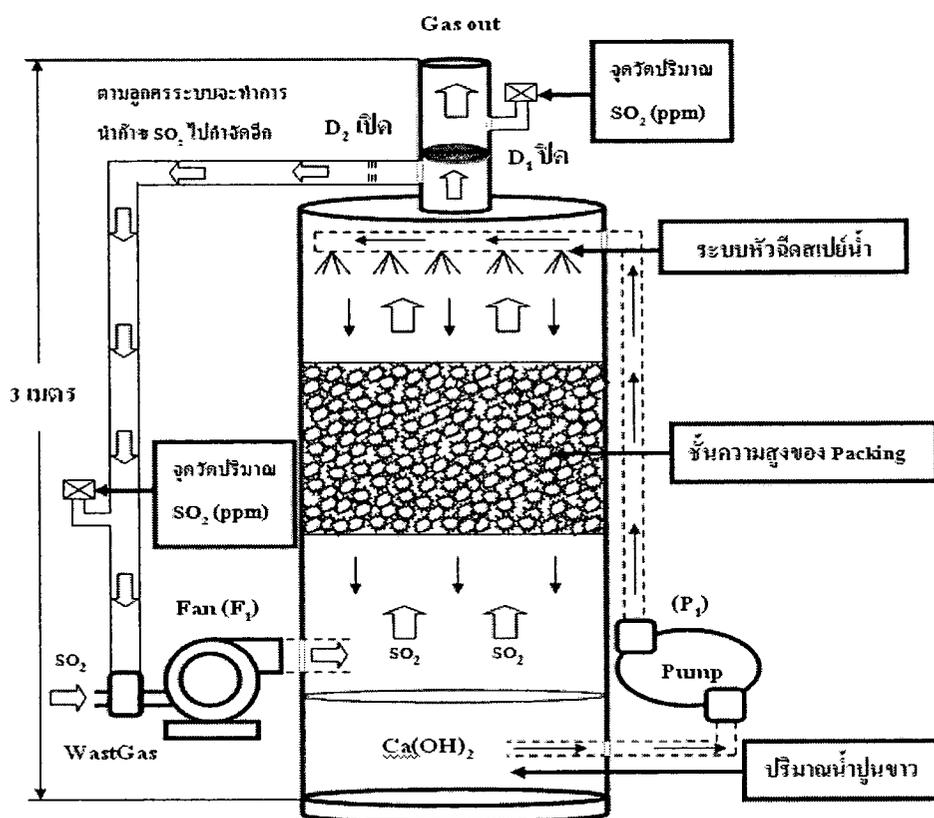
จากการคำนวณปริมาตรห้องมีค่า $3 \times 4.2 \times 2 = 37.8 \text{ m}^3$ ถ้าใช้อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมตามหัวข้อที่ผ่านมาคือ 165 cfm จะมีค่าความเร็วของก๊าซเฉลี่ยภายในหอบำบัดประมาณ 3.6 m/s หรือ 0.07 m³/s ดังนั้นจะต้องใช้เวลาในการดูดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากห้องรมทั้งสิ้น 9 นาที จากขนาดหอบำบัดซึ่งทำจากบล็อคซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm และสูง 40 cm จำนวน 7 ท่อน (ไม่นับท่อนล่างที่ใช้ใส่น้ำสารละลายตกลงมา) จะมีปริมาตรบรรจุก๊าซได้จำนวน 1.4 m³ ดังนั้นจะต้องทำการดูดก๊าซออกมาเป็นรอบๆ จำนวน $37.8/1.4 = 27$ รอบ ซึ่งถ้าจะทำการประมาณเวลาที่ใช้ในการดูดแต่ละรอบจะต้องใช้ประมาณ 20-80 วินาที (คิดเผื่อสำหรับกรณีเกิดแรงดันตกคร่อมสูงขึ้นเมื่อน้ำปุ๋ยใสไหลสวนทิศทางด้วย) ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เวลาคูด (Suction, S) ในการศึกษาเป็น 2 ระดับคือ 1 นาที และ 2 นาที

ส่วนเวลาในการหมุนซ้ำสามารถประมาณได้จากปริมาตรก๊าซที่ใช้หมุนวนกับจำนวนรอบที่หมุนวนเพื่อให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 60 ppm จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 นาที ตามระดับความเข้มข้นเริ่มต้น ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการเลือกใช้เวลามวนวนซ้ำ (Recirculated, R) ในการศึกษาเป็น 3 ระดับคือ 1 นาที 2 นาที และ 3 นาที

จากภาพที่ 41 แสดงหลักการทำงานของระบบหมุนเวียนการบำบัด ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่เป็นหัวใจของระบบหมุนเวียนการบำบัดคือวาล์วสามทาง (Three way valve) ซึ่งใช้ควบคุมทิศทางการไหลของก๊าซเพื่อดูดเข้า และหมุนวนซ้ำเพื่อทำการบำบัด จากข้อมูลทางการค้าพบว่าวาล์วสามทางแบบสำเร็จมีจำหน่ายเฉพาะในต่างประเทศ และราคาค่อนข้างสูงมาก (ขนาด 6 นิ้วราคาเกือบแสนบาท) ดังนั้นทางทีมผู้วิจัยจึงใช้การออกแบบทางวิศวกรรมเครื่องกลช่วยสร้างจากวัสดุที่มีในประเทศ ในภาพเป็นการประกอบชิ้นส่วน (Fabrication) จากท่อพีวีซีขนาด 6 นิ้วโดยใช้ท่อ 3 ทาง และข้อต่อตรง ภายในใช้แผ่นสแตนเลส (Stainless steel) ขนาด 6 นิ้ว ชนิด 316 ทนกรดหนา 5 mm มีแผ่นยางกันรั่วที่ขอบด้านใน ตัดเป็นแผ่นกลมเชื่อมแกนกับเหล็กเพลลา 4 หุน เพื่อต่อเป็นแกนหมุนปรับ (Swiching rod) เพื่อเปิดและปิดทิศทางการไหลของก๊าซตามต้องการ



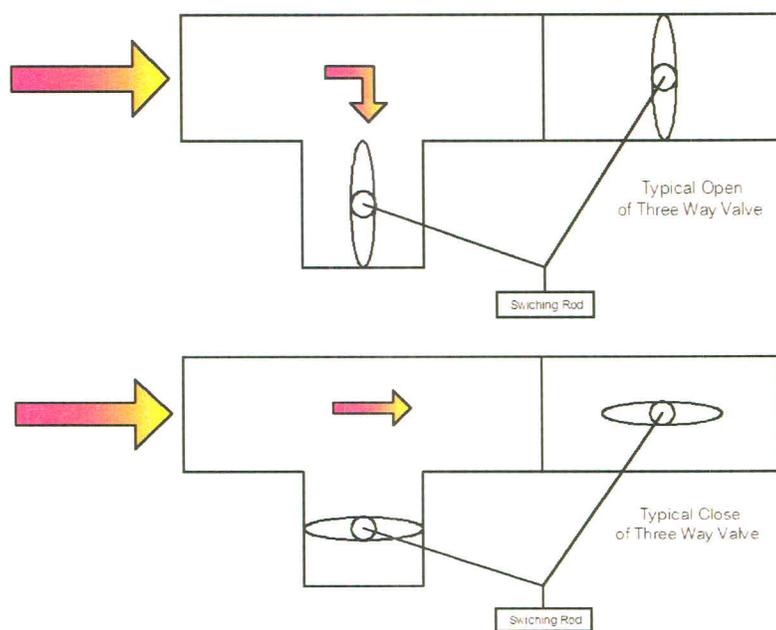
ภาพที่ 39 การทำงานของระบบหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดส่วนแรก



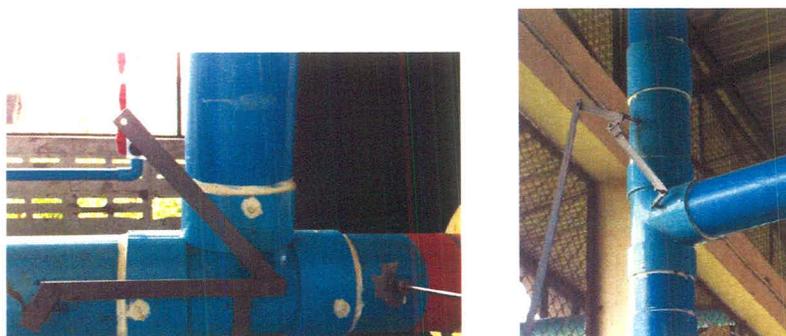
ภาพที่ 40 การทำงานของระบบหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดส่วนที่สอง

วาล์วสามทางถูกติดตั้งจำนวน 2 ตัว คือที่ตำแหน่งด้านล่างก่อนเข้าหอบำบัด และที่ตำแหน่งด้านบนก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 42 เพื่อบังคับทิศทางการไหลของก๊าซ ซึ่งใช้การปฏิบัติจริงจะต้องใช้การเปิดปิดวาล์วด้วยมือโยกทั้ง 2 ตำแหน่ง สำหรับตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งตำแหน่งทางเข้าและออกจะทำการเจาะรูขนาด 3 นิ้ว เพื่อให้หัววัดสอดเข้าไปยังตำแหน่งกึ่งกลางท่อพีวีซีได้ และใช้เทปกาวชนิดหนาปิดทับรูเมื่อไม่ได้ใช้งาน

สำหรับในกิจกรรมนี้จะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของหอบำบัดที่เป็นระบบหมุนเวียนการบำบัด ซึ่งจะใช้ข้อมูลจากการศึกษาที่ผ่านมาร่วมทำการทดสอบด้วย กล่าวคือใช้สภาวะที่เหมาะสมของหอบำบัดที่เป็นระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดที่ค่าอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำปูนใสเท่ากับ 70 ลิตรต่อนาที ส่วนสารละลายในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบระบบคั่งคือน้ำโซดาไฟผสมน้ำปูนใส โดยใช้สัดส่วนของปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต และปูนขาวตาม ค่าระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม



ภาพที่ 41 หลักการทำงานของวาล์วสามทาง



ภาพที่ 42 วาล์วสามทางตำแหน่งทางเข้า (ซ้าย) และทางออกหอบำบัด (ขวา)

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อใช้เวลาการดูดเข้าและเวลาการหมุนซ้ำ เปลี่ยนแปลง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อใช้เวลาการดูดเข้าและเวลาการหมุนซ้ำ
เปลี่ยนแปลง ถูกแสดงดังในตารางที่ 29 ถึง 34

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาใน
การหมุนซ้ำ 1 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
2 (R1)	ns	ns		
3	3089	513	83.39	
5 (R1)	ns	ns		
6	2703	347	87.16	
8 (R1)	ns	ns		
9	2209	270	87.78	
11 (R1)	ns	ns		
12	1869	210	88.76	
14 (R1)	ns	ns		75.90
15	1603	178	88.90	
17 (R1)	ns	ns		
18	1246	169	86.44	
20 R1	ns	ns		
21	779	99	87.29	
25	1907	749	60.72	
30	1049	465	55.67	
35	583	230	60.55	
40	293	129	55.97	
45	157	50	68.15	
50	60		100.00	98.80

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาใน
การหมุนซ้ำ 2 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
3 R2	ns	ns		
4	3165	105	96.68	
7 R2	ns	ns		
8	2903	96	96.69	
11 R2	ns	ns		
12	2445	87	96.44	
15 R2	ns	ns		
16	2157	87	95.97	
19 R2	ns	ns		
20	1878	66	96.49	
23 R2	ns	ns		
24	1450	49	96.62	
27 R2	ns	ns		89.55
28	1237	45	96.36	
31 R2	ns	ns		
32	1138	45	96.05	
35 R2	ns	ns		
36	992	37	96.27	
39 R2	ns	ns		
40	883	34	96.15	
43 R2	ns	ns		
44	761	29	96.19	
47 R2	ns	ns		
48	602	24	96.01	
55	772	152	80.31	
60	356	135	62.08	
65	158	87	44.94	
70	60			98.80

ตารางที่ 31 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 3 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
4 R3	ns	ns		
5	3260	37	98.87	
9 R3	ns	ns		
10	2778	35	98.74	
14 R3	ns	ns		
15	2343	35	98.51	
19 R3	ns	ns		
20	1994	28	98.60	
24 R3	ns	ns		
25	1612	24	98.51	
29 R3	ns	ns		
30	1409	23	98.37	
34 R3	ns	ns		89.59
35	1205	15	98.76	
39 R3	ns	ns		
40	848	8	99.06	
44 R3	ns	ns		
45	690	7	98.99	
49 R3	ns	ns		
50	576	7	98.78	
54 R3	ns	ns		
55	506	5	99.01	
60	643	190	70.45	
65	335	181	45.97	
70	186	90	51.61	
75	59		100.00	98.82

ตารางที่ 32 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 2 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 1 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
3 (R1)	ns	ns		
4	3451	478	86.15	
7 (R1)	ns	ns		
8	2821	379	86.57	
11 (R1)	ns	ns		
12	2186	245	88.79	
15 (R1)	ns	ns		
16	1920	216	88.75	
19 (R1)	ns	ns		
20	1619	158	90.24	
23 (R1)	ns	ns		75.33
24	1516	139	90.83	
27 (R1)	ns	ns		
28	1227	117	90.46	
31 (R1)	ns	ns		
32	1052	97	90.78	
35	918	465	49.35	
40	505	292	42.18	
45	242	136	43.80	
50	148	65	56.08	
55	59	25		98.82

ตารางที่ 33 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 2 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 2 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm

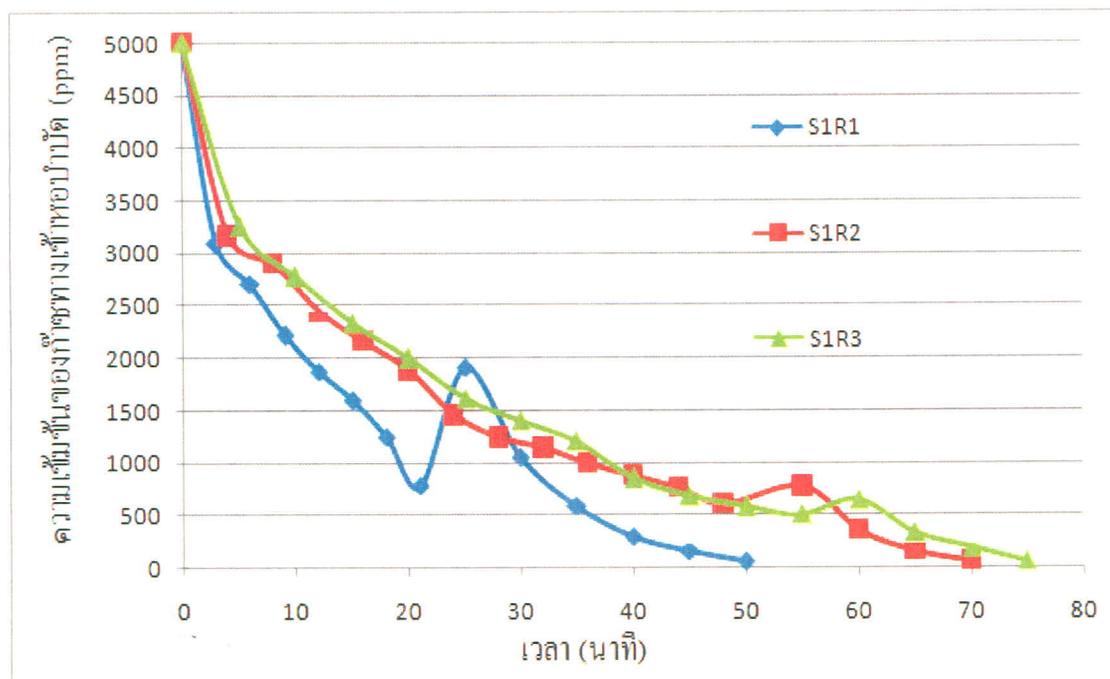
เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
4 R2	ns	ns		
5	3116	295	90.53	
9 R2	ns	ns		
10	3091	176	94.31	
14 R2	ns	ns		
15	2699	45	98.33	
19 R2	ns	ns		
20	2309	32	98.61	
24 R2	ns	ns		
25	1915	23	98.80	
29 R2	ns	ns		86.17
30	788	50	93.65	
34 R2	ns	ns		
35	690	7	98.99	
39 R2	ns	ns		
40	576	7	98.78	
44 R2	ns	ns		
45	772	182	76.42	
50	639	147	77.00	
55	416	132	68.27	
60	209	98	53.11	
65	109	69	36.70	
70	89	58	34.83	
75	56			98.88

ตารางที่ 34 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 2 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 3 นาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรวม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)		ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลาใดๆ (%)	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก		
0	5000	ns		
5 R3	ns	ns		
6	2948	30	98.98	
11 R3	ns	ns		
12	2498	21	99.16	
17 R3	ns	ns		
18	2085	25	98.80	
23 R3	ns	ns		
24	1699	21	98.76	
29 R3	ns	ns		
30	1438	20	98.61	
35 R3	ns	ns		
36	1270	19	98.50	86.33
41 R3	ns	ns		
42	1018	16	98.43	
47 R3	ns	ns		
48	846	14	98.35	
53 R3	ns	ns		
54	705	13	98.16	
59 R3	ns	ns		
60	606	12	98.02	
65	405	202	50.12	
70	215	135	37.21	
75	120	61	49.17	
80	58		100.00	98.84

4.2.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างเมื่อใช้เวลาในการดูด และเวลาในการหมุนซ้ำครั้งที่

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างเมื่อใช้เวลาในการดูด และเวลาในการหมุนซ้ำครั้งที่ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อกำหนดระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมที่ระดับ 5,000 ppm ดังแสดงในภาพที่ 43 และ 44

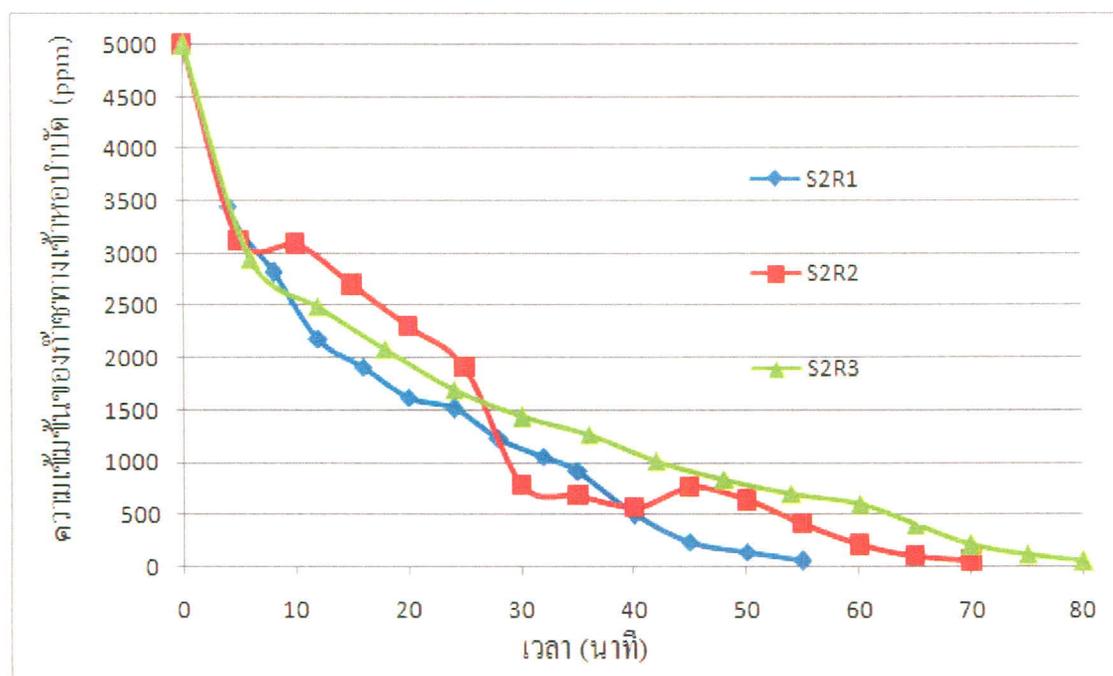


ภาพที่ 43 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

จากข้อมูลการศึกษาในระบบหมุนเวียนการบำบัด พบว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีเวลาเพียงพอที่จะหมุนวนผ่านเข้าหอบำบัดหลายครั้งจนมีค่าระดับความเข้มข้นสุดท้ายก่อนปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่าถ้าใช้เวลาในการหมุนซ้ำน้อยเกินไปค่าระดับความเข้มข้นสุดท้ายจะยังไม่ได้ตามต้องการคือต่ำกว่า 60 ppm แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการหมุนซ้ำค่าระดับความเข้มข้นสุดท้ายจะได้ต่ำกว่า 60 ppm เมื่อทำการคำนวณค่าประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาใดๆ จะพบว่ามีค่าสูงมาก (สูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากใช้การคำนวณจากค่าระดับความเข้มข้นทางเข้าและออกเทียบกัน

จากภาพที่ 43 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัด เมื่อใช้เวลาในการดูดครั้งที่ 1 นาที กับเวลาในการหมุนซ้ำต่างๆ กัน (เหตุผลที่ใช้ค่าความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดเพราะต้องการเปรียบเทียบแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้น ซึ่งถ้าใช้ค่าความเข้มข้นของก๊าซทางออก หรือค่าประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาใดๆ จะไม่เห็นค่าที่แตกต่างกัน) ในกราฟจะพบข้อสังเกตอันหนึ่งคือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าจะกระโดดขึ้น หรือมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อหยุดการหมุนวนซ้ำ เนื่องจากการเก็บข้อมูลในบางการทดลองผู้วิจัยเห็นว่าใช้เวลาในการบำบัดนานมากเกินไป และยังมีค่าระดับความเข้มข้นสูง

เกินกว่า 60 ppm อยู่มาก นั้นน่าจะเป็นเหตุมาจากการใช้เวลาในการหมუნช้ำน้อยไป จึงพยายามหยุดการบำบัดลงไม่ทำต่อเพราะไม่น่าจะเกิดประโยชน์อันใด



ภาพที่ 44 ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 2 นาที และเวลาในการหมუნช้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

จากภาพที่ 44 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัด เมื่อใช้เวลาในการดูดซับที่ 2 นาที กับเวลาในการหมუნช้ำต่างๆ กัน คล้ายกับภาพที่ผ่านมาซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการหมუნช้ำเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้นตามไปด้วย จำนวนเวลาที่สูงขึ้นในทางปฏิบัติผู้ประกอบการจะสูญเสียไป ทำให้การจัดส่งสินค้ามีขั้นตอนของเวลาเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามระดับค่าความเข้มข้นของก๊าซทางออกหอบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ตั้งแต่เวลาที่แรกของการบำบัดสามารถควบคุมให้มีระดับที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในขั้นตอนที่จะเปิดประตูห้องรมออกทั้งหมดเพื่อนำเอาชิ้นวางตะกร้าบรรจุลำไยสดออกมาเพื่อเตรียมส่งไปจำหน่ายต่างประเทศ (ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องการใช้เวลารวดเร็วเพื่อรวบรวมตะกร้าบรรจุลำไยสดทั้งหมดเข้าสู่คอนเทนเนอร์ติดเครื่องปรับอากาศเพื่อขนส่งไปยังท่าเรือ)

สำหรับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมสูงขึ้นไปคือที่ระดับ 10,000 ppm และ 15,000 ppm ก็ยังพบว่าควรใช้เวลาในการดูดเข้าหอบำบัดเพียงแค่ 1 นาที แต่ต้องใช้เวลาในการหมუნช้ำในระบบสูงขึ้น (ประมาณ 3-5 นาที) เพื่อที่จะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซทางออกหอบำบัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แต่อย่างไรก็ดีระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมสูงขึ้นไปจำเป็นต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้นไปด้วย

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติเมื่อใช้เวลาในการดูด และเวลาในการหมุนซ้ำเปลี่ยนแปลง

จากผลการศึกษาเมื่อใช้เวลาในการดูด และเวลาในการหมุนซ้ำเปลี่ยนแปลงที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm สามารถวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ดังแสดงในตารางที่ 35

ตารางที่ 35 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัด เมื่อใช้เวลาในการดูด และเวลาในการหมุนซ้ำเปลี่ยนแปลง

เวลาการหมุนซ้ำ (Recirculated)	R = 1 นาที	R = 2 นาที	R = 3 นาที
เวลาการดูดเข้า (Suction)			
S = 1 นาที	75.9%±5.257 ^a	89.55%±4.702 ^b	89.59%±4.867 ^b
	50 นาที	70 นาที	75 นาที
S = 2 นาที	75.33%±5.257 ^a	86.17%±5.051 ^a	86.33%±5.051 ^a
	55 นาที	75 นาที	80 นาที

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในแต่ละแถวที่มีตัวอักษรพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดดังตารางที่ 35 พบว่าเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติเบื้องต้นแล้วเวลาในการดูดเข้าหอบำบัดคงที่ 2 นาที พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ แต่เมื่อใช้เวลาในการดูดเข้าหอบำบัดคงที่ 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำเปลี่ยนแปลงที่ระยะเวลาหมุนซ้ำ 2 และ 3 นาที ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ส่วนที่เวลาหมุนซ้ำ 1 นาที นั้นมีความแตกต่างกันในทางสถิติ นั้นหมายความว่าควรเลือกใช้ระบบหมุนเวียนการบำบัดที่ 2 นาที เพราะใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่าที่ 3 นาที คือใช้เวลาในการบำบัด 70 นาที และ 75 นาที ตามลำดับ

ผลของเวลาที่ใช้ในการบำบัดจากการใช้ระบบหมุนเวียนการบำบัด พบว่ามีการใช้เวลา (70 นาที) สูงกว่าระบบเดิมที่เป็นแบบไม่หมุนเวียนการบำบัด (40 นาที) ซึ่งใช้เวลาสูงขึ้นกว่า 30 นาที (มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์) จะพบว่าไม่น่าจะเหมาะสมกับผู้ประกอบการ ดังนั้นทางทีมผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะวางแผนการศึกษาต่อไปเพื่อหาแนวทางการลดระยะเวลาในการบำบัดลง โดยยังคงประสิทธิภาพของหอบำบัดในการลดค่าระดับความเข้มข้นสุดท้ายลงให้ได้ต่ำกว่า 60 ppm จากการขอคำปรึกษาจากผู้ทรงคุณวุฒิ ทางทีมผู้วิจัยสามารถสรุปแนวทางการลดระยะเวลาในการบำบัดได้ 2 รูปแบบคือ การพัฒนาหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดใหม่ให้มีลักษณะหอบำบัดต่อเนื่อง ในลักษณะขนานหรืออนุกรมกัน ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในข้อเสนอแนะ เพราะไม่สามารถดำเนินการในโครงการนี้ได้ ส่วนรูปแบบที่สองจะทำการปรับสภาวะต่างๆ ในหอบำบัดเดิมนี้ให้ช่วยลดระยะเวลาในการบำบัด เช่นการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้หมุนเวียนในระบบบำบัดเร็วขึ้น เป็นต้น

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซมากขึ้น

จากผลการศึกษาหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ผ่านมา พบปัญหาหลักคือการใช้เวลาในการบำบัดสูงมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะพยายามหาแนวทางการลดระยะเวลาในการบำบัดลง โดยใช้การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้หมุนเวียนในระบบบำบัดเร็วขึ้น ซึ่งทางที่ผู้วิจัยเลือกเพิ่มอัตราการไหลก๊าซจาก 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที เป็น 218 และ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีตามลำดับ

ปัญหาที่สำคัญของการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้หมุนเวียนในระบบบำบัดเร็วขึ้นคือการกำหนดเวลาที่ตำแหน่งตรวจวัดทางเข้าและออก ดังแสดงในภาพที่ 45 และ 46 ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องมือวัด Testo 340 จะต้องป้อนไล่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากเครื่องจนหมดก่อนวัดใหม่ได้อีกครั้ง

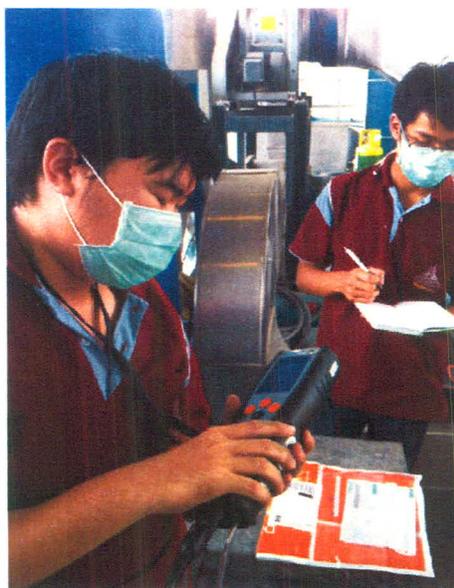


ภาพที่ 45 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซทางเข้าหอบำบัด



ภาพที่ 46 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซทางออกหอบำบัด

ดังนั้นในทางปฏิบัติทีมนักวิจัยจึงใช้รูปแบบการเก็บข้อมูลแบบทันทีในตอนการตรวจวัดที่ตำแหน่งทางขาเข้า ซึ่งมีข้อจำกัดของเวลาในการดูเข้าเพียง 1 นาทีเท่านั้น (ต้องใช้เวลาในการเก็บค่าที่สูงที่สุดประมาณ 1 นาทีและต้องรอให้ปั๊มไล่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากเครื่องจนหมดอีก 1 นาที) ซึ่งเวลาส่วนที่เกินจะรวมอยู่ในขั้นตอนการหมุนวนซ้ำในหอบำบัด ส่วนการตรวจวัดที่เวลาทางขาออกจะใช้รูปแบบการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง เพื่อดูปริมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขาออกที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 47 และ 48 ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์หาระยะเวลาการหมุนซ้ำที่เหมาะสมจริงในแต่ละระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม ซึ่งผลการศึกษาดูถูกแสดงดังตารางที่ 36 ถึง 44



ภาพที่ 47 เครื่องตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์



ภาพที่ 48 การอ่านค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 3 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)			ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 2:30	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)	
	ขาเข้า	ขาออก				
		R 2:00	R 2:30	R 3:00		
0	5000	ns	ns	ns		
4 (R3)	ns	ns	ns	ns		
5	3260	105	67	37	97.94	
9 (R3)	ns	ns	ns	ns		
10	2778	96	62	35	97.77	
14 (R3)	ns	ns	ns	ns		
15	2343	87	64	35	97.27	
19 (R3)	ns	ns	ns	ns		
20	1994	66	49	28	97.54	
24 (R3)	ns	ns	ns	ns		
25	1612	55	43	24	97.33	
29 (R3)	ns	ns	ns	ns		
30	1409	49	37	23	97.37	
34 (R3)	ns	ns	ns	ns		89.04
35	1205	37	19	15	98.42	
39 (R3)	ns	ns	ns	ns		
40	848	34	10	8	98.82	
44 (R3)	ns	ns	ns	ns		
45	690	29	9	7	98.70	
49 (R3)	ns	ns	ns	ns		
50	576	26	8	7	98.61	
54 (R3)	ns	ns	ns	ns		
55	506	24	6	5	98.81	
60	643	190			70.45	
65	335	181			45.97	
70	186	90			51.61	
75	59					98.82

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 3 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)			ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 2:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)	
	ขาเข้า	ขาออก				
		R 1:00	R 2:00	R 3:00		
0	5000	ns	ns	ns		
4 (R3)	ns	ns	ns	ns		
5	3089	513	59	28	98.09	
9 (R3)	ns	ns	ns	ns		
10	2703	347	51	24	98.11	
14 (R3)	ns	ns	ns	ns		
15	2209	270	44	23	98.01	
19 (R3)	ns	ns	ns	ns		
20	1869	178	37	20	98.02	
24 (R3)	ns	ns	ns	ns		
25	1603	169	31	15	98.07	
29 (R3)	ns	ns	ns	ns		
30	1246	210	62	40	95.02	
34 (R3)	ns	ns	ns	ns		89.50
35	1042	191	59	34	94.34	
39 (R3)	ns	ns	ns	ns		
40	881	203	59	30	93.30	
44 (R3)	ns	ns	ns	ns		
45	779	99	28	14	96.41	
49 (R3)	ns	ns	ns	ns		
50	444	82	28	15	93.69	
54 (R3)	ns	ns	ns	ns		
55	364	57	16	9	95.60	
60	443	254			42.66	
65	156	59			62.18	
70	51					98.98

ตารางที่ 38 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 3 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 5,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)				ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 1:30	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก				
		R 1:00	R 1:30	R 2:00		
0	5000	ns	ns	ns		
4 (R3)	ns	ns	ns	ns		
5	2347	234	62	31	97.36	
9 (R3)	ns	ns	ns	ns		
10	1755	181	61	31	96.52	
14 (R3)	ns	ns	ns	ns		
15	1438	179	55	31	96.18	
19 (R3)	ns	ns	ns	ns		
20	1079	144	49	28	95.46	
24 (R3)	ns	ns	ns	ns		
25	819	130	57	39	93.04	
29 (R3)	ns	ns	ns	ns		90.27
30	434	78	35	23	91.94	
34 (R3)	ns	ns	ns	ns		
35	361	69	32	19	91.14	
39 (R3)	ns	ns	ns	ns		
40	299	60	29	18	90.30	
44 (R3)	ns	ns	ns	ns		
45	158	64	27	10	82.91	
49 (R3)	ns	ns	ns	ns		
50	130	20	9	4	93.08	
54 (R3)	ns	ns	ns	ns		
55	186	65			65.05	
60	57					98.86

ตารางที่ 39 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 10,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)					ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 4:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก					
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 4:00		
0	10000	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
6	9400	460	308	227	174	98.15	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
11	8500	256	219	135	75	99.12	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
16	6500	254	96	54	35	99.46	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
21	5570	181	76	52	23	99.59	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
25	3900	131	45	27	14	99.64	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
30	3347	103	44	19	11	99.67	
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		84.58
35	2379	76	28	17	10	99.58	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
40	1787	58	18	14	8	99.55	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
45	1120	33	14	11	5	99.55	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
50	948	29	11	8	3	99.68	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
55	607	342				43.66	
60	538	236				56.13	
65	365	146				60.00	
70	267	110				58.80	
75	196	86				56.12	
80	56						99.44

ตารางที่ 40 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 10,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)					ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 3:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก					
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 4:00		
0	10000	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
6	7977	257	181	144	110	98.19	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
11	3481	179	115	88	71	97.47	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
16	2797	136	106	90	73	96.78	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
21	2039	78	65	53	36	97.40	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
25	1740	76	53	42	33	97.59	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
30	1302	51	39	33	28	97.47	
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		89.74
35	982	47	34	27	20	97.25	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
40	802	31	24	18	14	97.76	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
45	628	24	19	17	11	97.29	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
50	487	18	16	13	10	97.33	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
55	355	15	13	11	9	96.90	
60	278	105				62.23	
65	188	66				64.89	
70	116	49				57.76	
75	49						99.51

ตารางที่ 41 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 10,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)					ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 2:30	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก					
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 4:00		
0	10000	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
6	7784	203	87	53	39	98.88	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
11	5507	169	57	41	32	98.96	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
16	3621	147	53	33	29	98.54	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
21	2733	144	44	32	28	98.39	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
25	2028	121	38	30	27	98.13	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
30	1321	114	36	30	26	97.27	
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		85.27
35	946	112	35	28	25	96.30	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
40	926	98	34	28	25	96.33	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
45	848	72	33	27	24	96.11	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
50	607	60	27	25	22	95.55	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns		
55	365	146				60.00	
60	196	110				43.88	
65	86	60				30.23	
70	48						99.52

ตารางที่ 42 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 165 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 15,000 ppm

เวลา (min)	ขาเข้า	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)					ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลา R 4:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
		ขาออก						
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 3:30	R 4:00		
0	15000	ns	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
6	8977	1263	512	342	242	184	97.95	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
11	4085	985	503	310	213	140	96.57	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
16	3271	734	472	307	201	121	96.30	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
21	2737	541	441	302	164	116	95.76	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
25	2185	504	410	298	149	76	96.52	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
30	1684	264	238	205	143	69	95.90	
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
35	1369	157	133	124	89	65	95.25	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
40	1176	122	104	91	77	55	95.32	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
45	972	114	98	76	65	51	94.75	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
50	834	103	84	68	55	49	94.12	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
55	694	97	73	61	52	46	93.37	
59 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
60	594	85	69	53	45	42	92.93	
64 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
65	452	167					63.05	
70	416	135					67.55	
75	281	122					56.58	
80	112	44					60.71	
85	43							99.71

87.04

ตารางที่ 43 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 218 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 15,000 ppm

เวลา (min)	ขาเข้า	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)					ประสิทธิภาพหอบำบัด เวลา R 4:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
		ขาออก						
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 3:30	R 4:00		
0	15000	ns	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
6	7987	1241	604	410	219	143	98.21	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
11	4058	993	503	310	156	121	97.02	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
16	3179	743	427	298	149	107	96.63	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
21	2147	593	414	279	145	96	95.53	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
25	1923	506	290	184	133	76	96.05	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
30	1382	279	178	122	89	67	95.15	
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
35	815	167	108	85	66	50	93.87	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
40	536	140	82	56	44	39	92.72	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
45	363	105	69	52	41	36	90.08	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
50	344	102	62	47	35	26	92.44	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
55	708	520					26.55	
60	334	230					31.14	
65	139	98					29.50	
70	69	38					44.93	
75	49							99.67

77.13

ตารางที่ 44 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ใช้เวลาในการดูด 1 นาที และเวลาในการหมุนซ้ำ 4 นาที ด้วยอัตราการไหลของก๊าซคงที่ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรม 15,000 ppm

เวลา (min)	ความเข้มข้น SO ₂ (ppm)						ประสิทธิภาพ หอบำบัด เวลา R 4:00	ประสิทธิภาพหอบำบัด ณ เวลาสิ้นสุด (%)
	ขาเข้า	ขาออก						
		R 2:00	R 2:30	R 3:00	R 3:30	R 4:00		
0	15000	ns	ns	ns	ns	ns		
5 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
6	7652	1382	566	290	184	91	92.60	
10 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
11	3952	923	506	279	178	89	87.20	
15 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
16	3357	815	363	235	140	85	89.19	
20 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
21	2736	541	297	156	107	82	89.14	
25 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
25	1987	538	190	131	104	68	90.44	
29 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
30	1757	330	146	87	68	60	91.69	80.19
34 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
35	1259	303	134	83	65	52	89.36	
39 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
40	998	285	125	79	58	48	87.47	
44 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
45	607	245	108	65	54	43	82.21	
49 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
50	426	236	92	57	49	32	78.40	
54 (R4)	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
55	454	248					45.37	
60	292	131					55.14	
65	165	59					64.24	
70	48							99.68

จากตารางผลการศึกษาที่ 36 ถึง 44 จะพบว่าเมื่อใช้เวลาในการดูด 1 นาที และใช้อัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ppm ตามลำดับดังนี้

ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 165 เป็น 218 และ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ตามลำดับ ควรใช้เวลาในการหมุนซ้ำลดลงเป็น 2:30 2:00 และ 1:30 นาที ตามลำดับ เนื่องจากสามารถช่วยลดค่าระดับความเข้มข้นทางออกก่อนปล่อยในครั้งแรกลงได้ประมาณ 60 ppm และมีประสิทธิภาพบำบัดเฉลี่ยสูงขึ้น

ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 10,000 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 165 เป็น 218 และ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ตามลำดับ ควรใช้เวลาในการหมุนซ้ำลดลงเป็น 4:00 3:00 และ 2:30 นาที ตามลำดับ เนื่องจากสามารถช่วยลดค่าระดับความเข้มข้นทางออกก่อนปล่อยในครั้งแรกลงได้ต่ำกว่า 90 ppm และมีประสิทธิภาพบำบัดเฉลี่ยสูงขึ้น

ที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 15,000 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 165 เป็น 218 และ 272 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ตามลำดับ ควรใช้เวลาในการหมุนซ้ำเป็น >4:00 >4:00 และประมาณ 4:00 นาทีตามลำดับ เนื่องจากสามารถช่วยลดค่าระดับความเข้มข้นทางออกก่อนปล่อยในครั้งแรกลงได้ต่ำกว่า 100 ppm และมีประสิทธิภาพบำบัดเฉลี่ยสูงขึ้น

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อระดับความเข้มข้นหลังการรม และอัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลง

ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อระดับความเข้มข้นหลังการรม และอัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลงถูกแสดงดังในตารางที่ 45

ตารางที่ 45 ผลการทดสอบของค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อระดับความเข้มข้นหลังการรมและอัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลง

ระดับความเข้มข้นหลังการรม	5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
อัตราการไหลของก๊าซ			
165 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาทีกี	89.59%	84.58%	87.04%
	75 นาที	80 นาที	85 นาที
218 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาทีกี	89.50%	89.74%	77.13%
	70 นาที	75 นาที	75 นาที
272 ลูกบาศก์ฟุตต่อ นาทีกี	90.27%	85.27%	80.19%
	60 นาที	70 นาที	70 นาที

จากตารางผลการศึกษาค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลง จะพบว่าที่ค่าระดับความเข้มข้นหลังการรมต่างๆ ไม่ได้ช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยแต่อย่างใด แต่กลับทำให้ค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยตกลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นส่งผลให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนบำบัดในหอได้เร็วขึ้น จนมีค่าระดับความเข้มข้นทางออกก่อนปล่อยต่ำลงจนพอใจในระดับหนึ่ง (อาจสูงกว่า 60 ppm) และทำให้ลดระยะเวลาในการบำบัดลงได้ ซึ่งจากตารางผลการทดสอบเปรียบเทียบจะเห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ppm ตามลำดับ สามารถลดระยะเวลาในการบำบัดลงได้สูงสุดจำนวน 15 10 และ 5 นาที ตามลำดับ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงประมาณ 20 12.5 17.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 38 41 44 พบว่าสามารถลดค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกได้ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในช่วงของการบำบัด 10 นาทีแรกพบว่าหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ใช้ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ppm ตามลำดับ สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดแบบไม่หมุนเวียนการบำบัดจาก 65.01 76.58 และ 59.60% ตามลำดับ เป็นประสิทธิภาพหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดที่ 96.52 98.96 และ 87.20% ตามลำดับ

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดกับระบบหมุนเวียนการบำบัด

ผลการศึกษาเปรียบเทียบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดกับระบบหมุนเวียนการบำบัด ถูกแสดงดังในตารางที่ 46

ตารางที่ 46 ผลการทดสอบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดกับระบบหมุนเวียนการบำบัด

ระดับความเข้มข้นหลังการรม	5,000 ppm	10,000 ppm	15,000 ppm
ระบบการบำบัดก๊าซ			
ระบบไม่หมุนเวียนการบำบัด	63.11%	51.15%	50.93%
(แบบเดิม)	40 นาที	45 นาที	55 นาที
ระบบหมุนเวียนการบำบัด	90.27%	85.27%	80.19%
(แบบที่พัฒนาขึ้นมา)	60 นาที	70 นาที	70 นาที
ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น	20.36%	40.01%	36.49%
เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น	33.33%	35.71%	21.43%

จากตารางผลการศึกษาเปรียบเทียบหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างระบบไม่หมุนเวียนการบำบัดกับระบบหมุนเวียนการบำบัดดังแสดงในตารางเป็นบทสรุปเรื่องสุดท้ายของโครงการวิจัยนี้ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อต้องการออกแบบและสร้างหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหมาะสมและสามารถนำมาใช้กับกระบวนการผลลำไยสดในเชิงอุตสาหกรรมขนาดกลางหรือเชิงการค้าได้ จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ppm ตามลำดับ สามารถช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยได้สูงสุดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นประมาณ 20.36 40.01 และ 36.49 % ตามลำดับ โดยค่าที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 15,000 มีค่าเป็น 36.49 % เพราะคิดเพียงแค่เมื่อใช้ระยะเวลาการหมุนวนในหอบำบัดเพียง 4 นาทีเท่านั้น ถ้าเพิ่มปริมาณเวลาที่ใช้หมุนวนในหอบำบัดก็จะสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยได้สูงกว่านี้ แต่ก็จะทำให้ระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น

ส่วนที่ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมเป็น 5,000 10,000 15,000 ppm ตามลำดับ จะทำให้ใช้เวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น (ไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมเชิงการค้า) โดยมีค่าเวลาเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นประมาณ 33.33 35.71 และ 21.43 % ตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มาตรฐานแบบเปียกแบบระบบหมุนเวียนการบำบัด

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมด ทางทีมผู้วิจัยได้พยายามพัฒนากระบวนการของหอบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาใช้ระบบหมุนเวียนการบำบัด ซึ่งมีจุดเด่นอยู่ที่เป็นกระบวนการที่สามารถช่วยลดค่าระดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตำแหน่งทางออกจากหอบำบัดตั้งแต่วันที่แรกที่เริ่มการบำบัดให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเอาไว้คือ 60 ppm ซึ่งต่างจากระบบเดิมที่สถานประกอบการใช้กันอยู่คือแบบไม่หมุนเวียนการบำบัดซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วเปรียบเสมือนการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมากตั้งแต่วันที่แรก อย่างไรก็ตามผลการศึกษาถึงแม้จะช่วยพัฒนาระบบได้ดี และยังสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพหอบำบัดเฉลี่ยให้สูงขึ้นได้กว่าเดิม แต่ก็ยังคงต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานมากอยู่

ประเด็นที่ควรต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมคือในเรื่องของระดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหมาะสมก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม และระดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สุดท้ายที่อยู่ในห้องรมก่อนทำการเปิดห้องนำตะกร้าลำไยออกมา กล่าวคือตามเอกสารอ้างอิงซึ่งกำหนดของมลพิษประเภทก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากแหล่งที่มาของสารเจือปนประเภทเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศไม่เกิน 60 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ส่วนระดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สุดท้ายที่อยู่ในห้องรมก่อนทำการเปิดห้องนำตะกร้าลำไยออกมา ซึ่งผู้ปฏิบัติงานขนย้ายสินค้าสามารถใช้อุปกรณ์ที่เป็นหน้ากากปิดจมูกอย่างดี และเว้นระยะจกใส่ป้องกันก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลืตกค้างในห้องได้ในระดับไม่เกิน 200 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

ประเด็นเรื่องการนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ต่อไป กล่าวคือจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าสถานประกอบการห้องรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสดมีระบบของห้องรมอยู่ 2 แบบ คือแบบแรกคือระบบหมุนเวียนในห้อง (Circulated air) หรือแบบเดิมซึ่งต้องใช้ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมประมาณ 15,000 -20,000 ppm เพราะใช้การเผาผงกำมะถันเพื่อสร้างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนแบบที่สองคือระบบหมุนเวียนแบบบังคับอากาศในแนวตั้ง หรือแบบที่ จักรพงษ์ และคณะ, 2554 พัฒนาขึ้นมาซึ่งใช้ระดับความเข้มข้นสุดท้ายหลังการรมประมาณ 4,000 -5,000 ppm เนื่องจากใช้ระบบดึงอัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้นแทนการเผาผงกำมะถัน ซึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมา ทีมนักวิจัยได้พัฒนาระบบหอบำบัดไว้สำหรับทั้งสองระบบที่กล่าวมาอยู่แล้ว สถานประกอบการต่างๆ สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปศึกษาและทดลองใช้กับระบบที่ตนเองมีได้ เพียงแค่ติดตั้งระบบท่อหมุนเวียนการบำบัด และวาล์วสามทางควบคุมทิศการไหล ซึ่งสามารถประยุกต์ให้สามารถใช้งานได้สะดวกด้วยการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบไฟฟ้า (คูภาคผนวก) หรือถ้าประสงค์ที่จะใช้งานหอบำบัดแบบหมุนเวียนการบำบัดให้มีทั้งประสิทธิภาพการบำบัดสูงเพื่อความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่าหอบำบัดแบบเดิมก็สามารถใช้ระบบดังกล่าวแบบสองหอบำบัดคู่ขนานซึ่งจะช่วยลดเวลาในการบำบัดลงได้มากกว่าระบบหอบำบัดแบบเดิม ซึ่งจะมีประโยชน์สูงสุดตามที่ทีมนักวิจัยมุ่งหวังไว้

ปัญหาและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

ปัญหาสำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ส่วนใหญ่มักพบในระหว่างการเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ในหอบำบัดมาตรฐานแบบเปียก ได้แก่

1. ปัญหาเกี่ยวกับเครื่องมือวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เนื่องจากเครื่องวัดรุ่น Testo 340 ที่ได้รับความอนุเคราะห์เงินสนับสนุนงบประมาณจาก สกว. มานั้นมีข้อจำกัดในเรื่องขอบเขตการวัด ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีในช่วง 0-15,000 ppm ดังนั้นที่ระดับค่าความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 20,000 ppm จึงไม่สามารถวัดได้ในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้กระบวนการเก็บข้อมูลที่ถูกต้องนั้นค่อนข้างซับซ้อนซึ่งทุกครั้งที่ทำการเก็บข้อมูลจะต้องทำการป้อนอากาศออกจากเครื่องมือวัดจนหมดทุกครั้งก่อนเริ่มทำการวัดครั้งต่อไป เป็นผลทำให้ช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลมีข้อจำกัดในการรอเครื่องวัดพร้อมทำการจะเก็บข้อมูล

2. ปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมการเปิดปิดวาล์วสามทางทั้งในตำแหน่งทางเข้าและทางออก กล่าวคือที่ตำแหน่งทางออกตำแหน่งตรวจวัดจะอยู่สูงมาก บริเวณทางปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (ประมาณ 3 เมตร) ดังนั้นจำเป็นต้องต่อกลไกบังคับเปิดปิดวาล์วลงมาข้างล่างเพื่อให้การทำงานสะดวก แต่อย่างไรก็ตามกลไกการบังคับเปิดปิดจะต้องทำการปฏิบัติด้วยมือ และจะต้องเปิดปิดทันทีในช่วงเวลาที่กำหนดเอาไว้ ทำให้ต้องใช้แรงงานคนขึ้นกำกับเพื่อเปิดปิดได้ทันที ทางทีมผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาต่อยอดระบบควบคุมวาล์วสามทางอัตโนมัติด้วยไฟฟ้าพร้อมกันทั้งสองตำแหน่ง เพื่อความสะดวกต่อการปฏิบัติงานจริงในเชิงอุตสาหกรรม พร้อมทั้งยังสามารถเขียน โปรแกรมควบคุมการทำงานเปิดปิดได้อย่างเหมาะสม

การใช้ประโยชน์จากงานวิจัย

ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถผลักดันกระบวนการออกไปสู่การใช้ประโยชน์ได้โดยการจัดสัมมนาเชิงวิชาการในงานลำไยต่างๆ เพื่อเผยแพร่ความรู้ทางด้านการออกแบบและการปฏิบัติการเชิงทำงานแก่ผู้ประกอบการส่งออกผลลำไยสดเพื่อสร้างความปลอดภัยในการทำงาน โดยมีผู้ที่คาดว่าจะได้ประโยชน์จากผลการศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วย กรมวิชาการเกษตรจะได้รูปแบบกระบวนการของโรงรมและหอบำบัดที่ปลอดภัย และรักษาสิ่งแวดล้อม สามารถใช้เป็นมาตรฐานหรือนโยบายเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รวมไปถึงผู้ประกอบการ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในโรงรมและหอบำบัด จะได้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน