

การเพิ่มมูลค่าสีทามั่งอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VALORIZATION OF WALL PAINT BY IMPROVING ITS CARBON DIOXIDE CAPTURE
PERFORMANCE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การเพิ่มมูลค่าสีทาผนังอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ |
| โดย | น.ส.วรัญญา ชันติอุดม |
| สาขาวิชา | เคมีเทคนิค |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิพย์ธีระนันทน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... กรรมการ
(ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

วรัญญา ชั้นดีอุตม : การเพิ่มมูลค่าสีทาผนังอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์. (VALORIZATION OF WALL PAINT BY IMPROVING ITS CARBON DIOXIDE CAPTURE PERFORMANCE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนยังคงเป็นวิกฤตสำคัญสำหรับนานาชาติ เนื่องจากการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจ ขนส่ง และอุตสาหกรรม ก่อให้เกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนชั้นบรรยากาศในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับตัวดูดซับของแข็งบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ภาวะบรรยากาศ จึงสามารถนำมาประยุกต์กับสีทาผนังรุ่นใหม่เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเพิ่มมูลค่าสีทาผนังอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะสร้างอุปกรณ์ทดสอบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี และศึกษาความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีเมื่อสัดส่วนตัวดูดซับ อัตราการไหลของแก๊ส ความชื้น และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารดูดซับ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับของสีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีจะถูกจำกัดด้วยสมบัติบางประการของสี เช่น ความเงา เป็นต้น ในการทดสอบที่ภาวะต่าง ๆ พบว่า ความสามารถในการดูดซับจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของแก๊สและความชื้น แต่จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ ในการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังที่มีการเคลือบด้วยสี โดยปรับให้แบบจำลองให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากห้องปฏิบัติการในช่วงเวลา 0 - 21 วินาที เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเป็นแบบคายความร้อน แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นบนกระดาษจำลองและผลกระทบต่ออุณหภูมิเนื่องจากพฤติกรรมของการไหลของแก๊ส

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270156723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Greenhouse gas Carbon dioxide capture Paint Solid adsorption

Waranya Khantiudom : VALORIZATION OF WALL PAINT BY IMPROVING ITS CARBON DIOXIDE CAPTURE PERFORMANCE. Advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

Nowadays, global warming is one of the world's major crisis due to the rapid growth of the economy, transportation, and industry that lead to large CO₂ emission into the atmosphere. Some solid adsorbents can react with carbon dioxide (CO₂) under atmospheric pressure. It could provide a new generation of paints with the capacity of CO₂ capture. In this research, valorization of wall paint was presented by improving its CO₂ capture performance. The apparatus for testing CO₂ capture from paint was designed and built. Several factors were investigated to obtain the CO₂ capture capacity of adsorbent in the paint. The results showed that the increasing solid adsorbent could raise the adsorption capacity of the paint due to the higher reactant. However, the adsorption capacity was limited by some properties in paint such as glossy. Moreover, the increasing gas flow rate and moisture enhanced CO₂ adsorption capacity. On the other hand, the increasing temperature decreased CO₂ adsorption capacity. Furthermore, the simulation was conducted to study the temperature change on the wall. To have the CO₂ adsorption capacity similar to that obtained from the experiment, the simulation time was carried out in a range of 0 - 21 seconds. Since it is an exothermic reaction, the simulation shows the wall's temperature, heat distribution on the painted wall and the effect of hydrodynamics on the temperature on the wall.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การเพิ่มมูลค่าสีทาผนังอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจากบุคคลหลายฝ่าย จึงขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมทั้งมอบความรู้ ความเข้าใจด้านวิชาการอย่างดียิ่ง ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมา และ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ ตลอดจนการให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็น เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุ 72 พรรษา

ขอขอบพระคุณบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย ตลอดจนความรู้ ข้อมูล คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับสี และการจัดเตรียมสีที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย

ขอขอบพระคุณดร.ธรรพดิษฐ์ ยุระตา คุณสุชาติ กริแสง และคุณไม้ไผ่ ตะห์ลัน ที่มอบความช่วยเหลือและคำปรึกษาสำหรับงานวิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการ Cybernetics ทุกท่านตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้คำปรึกษาและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจสำคัญและสนับสนุนทุกสิ่งเสมอมา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย..... | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 4 |
| 1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย..... | 6 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture)..... | 7 |
| 2.1.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)..... | 7 |
| 2.1.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion)..... | 8 |
| 2.1.3 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)..... | 8 |
| 2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้..... | 8 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption process)..... | 9 |
| 2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)..... | 10 |
| 2.2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation process) | 12 |
| 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการดูดซับ | 12 |
| 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ | 12 |
| 2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ..... | 12 |
| 2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี | 13 |
| 2.3.2 กลไกการดูดซับ | 14 |
| 2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ..... | 15 |
| 2.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ..... | 16 |
| 2.4.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) [19] | 16 |
| 2.4.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) [19] | 17 |
| 2.4.3 แบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's model)..... | 17 |
| 2.5 สีทาผนังอาคาร | 18 |
| 2.5.1 ชนิดของสีทาผนังอาคาร [21]..... | 18 |
| 2.5.1.1 การจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคาร แบ่งตามพื้นผิวของวัสดุที่ทา..... | 18 |
| 2.5.1.2 การจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคารแบ่งตามการใช้งาน..... | 19 |
| 2.5.2 องค์ประกอบของสีทาผนังอาคาร..... | 19 |
| 2.5.2.1 สารยึดเกาะ (Binder: Latex / Resin)..... | 19 |
| 2.5.2.2 ผงสี (Pigment) และ แป้งเพิ่มเนื้อ (Extender/Filler)..... | 20 |
| 2.5.2.3 สารเติมแต่ง (Additive) | 21 |
| 2.5.2.4 ตัวทำละลาย (Solvent)..... | 21 |
| 2.5.3 เกรดของสี | 22 |
| 2.5.4 หลักการทำงานของสี..... | 22 |

| | |
|--|----|
| 2.5.5 กระบวนการผลิตสี่ชั้นพื้นฐาน | 22 |
| 2.6 โปรแกรม LabVIEW [30] | 23 |
| 2.6.1 Data Flow and Programing | 23 |
| 2.6.2 หลักการทำงานของ LabVIEW | 24 |
| 2.6.3 ระบบ DAQ บน PC [32]..... | 25 |
| 2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)..... | 26 |
| 2.7.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)..... | 26 |
| 2.7.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)..... | 27 |
| 2.7.3 ขั้นตอนหลังการประมวล (Post-Processing)..... | 27 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 28 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 32 |
| 3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น | 32 |
| 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 33 |
| 3.2.1 สารเคมี..... | 33 |
| 3.2.2 แก๊ส..... | 34 |
| 3.2.3 อุปกรณ์ในการเตรียมสี..... | 34 |
| 3.2.4 ตัวควบคุมการไหลของแก๊ส..... | 34 |
| 3.2.5 เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์..... | 34 |
| 3.2.6 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ..... | 34 |
| 3.2.7 เซนเซอร์วัดความดัน..... | 35 |
| 3.2.8 เซนเซอร์วัดมลภาวะทางอากาศ (ความชื้น, PM 2.5, พอร์มาลดีไฮด์)..... | 35 |
| 3.2.9 โครงตั้งเครื่อง | 35 |
| 3.2.10 วัสดุของตัวเครื่อง | 35 |
| 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง..... | 36 |

| | |
|--|-----|
| 3.4.2.1.4 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบวัฏภาค (Species conservation equation) | 56 |
| 3.4.2.1.5 สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวดแกว่ง (Conservation of solid fluctuating energy equation) | 57 |
| 3.4.2.2. สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction equation)..... | 59 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 60 |
| 4.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารที่ได้รับการปรับปรุงชนิดต่าง ๆ | 60 |
| 4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาผนังอาคารที่มีตัวดูดซับในภาวะต่าง ๆ | 70 |
| 4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี | 73 |
| 4.4 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังที่เคลือบด้วยสีที่ปรับปรุงสมบัติการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ | 77 |
| 4.4.1 การทดสอบปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ (Mesh independent test) | 77 |
| 4.4.2 ผลของแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดานจำลองที่มีการเคลือบด้วยสีที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ | 78 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 82 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 82 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 85 |
| ภาคผนวก..... | 86 |
| บรรณานุกรม..... | 95 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 101 |

สารบัญตาราง

| | | |
|-------------|--|----|
| ตารางที่ 1 | ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [17] | 13 |
| ตารางที่ 2 | การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสีทาภายนอกและสีทาภายใน [26]..... | 19 |
| ตารางที่ 3 | ผงสีประเภทสารประกอบอนินทรีย์ที่ใช้ในการผสมสี [27]..... | 20 |
| ตารางที่ 4 | ภาวะที่ใช้ในการศึกษาสัดส่วนตัวดูดซับของแข็งในสีทาอาคารต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคาร..... | 45 |
| ตารางที่ 5 | ภาวะที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคารที่ตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป | 46 |
| ตารางที่ 6 | ข้อมูลองค์ประกอบที่ศึกษาภายในสี..... | 47 |
| ตารางที่ 7 | ชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมตัวดูดซับลงในสีทาอาคาร | 48 |
| ตารางที่ 8 | ชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อภาวะต่าง ๆ เปลี่ยนแปลง | 49 |
| ตารางที่ 9 | สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ศึกษา..... | 50 |
| ตารางที่ 10 | ข้อมูลการจำลองในการหาเซลล์การคำนวณที่เหมาะสม | 52 |
| ตารางที่ 11 | คุณสมบัติของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง..... | 53 |
| ตารางที่ 12 | ภาวะดำเนินการและขอบเขต..... | 54 |
| ตารางที่ 13 | การทดสอบความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์และระบบ | 62 |
| ตารางที่ 14 | ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ไม่มีการผสมสารดูดซับ | 63 |
| ตารางที่ 15 | ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นสารดูดซับ | 64 |
| ตารางที่ 16 | ความสามารถในการดักจับของสี Paint1 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ | 65 |
| ตารางที่ 17 | ความสามารถในการดักจับของสี Paint2 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ | 65 |
| ตารางที่ 18 | ความสามารถในการดักจับของสี Paint3 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ | 65 |

ตารางที่ 19 ลักษณะของสีก่อนทาและหลังทา 67

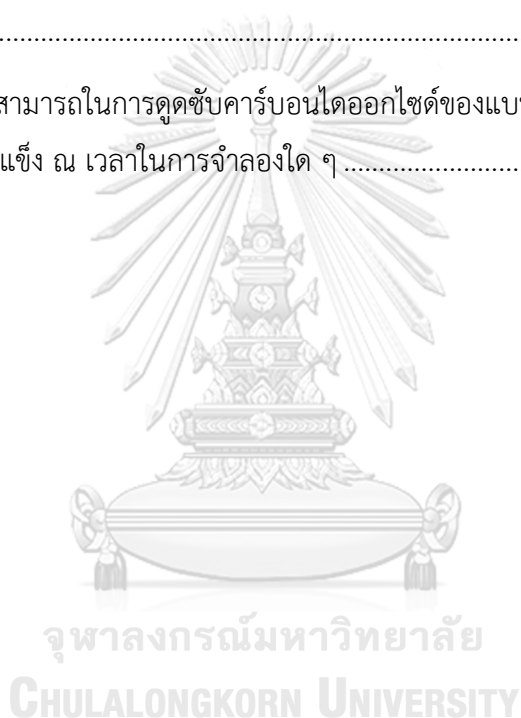
ตารางที่ 20 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์
เป็นสารดูดซับเปรียบเทียบกับสีอ้างอิง 69

ตารางที่ 21 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิแก๊สที่เปลี่ยนแปลง 73

ตารางที่ 22 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับในสีของตัวดูดซับ
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ 76

ตารางที่ 23 ค่าความดันเฉลี่ยภายในแบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
ของสี 78

ตารางที่ 24 ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองที่สัดส่วนโดยมวลเฉลี่ย
ของของแข็ง ณ เวลาในการจำลองใด ๆ 79



สารบัญรูปภาพ

| | |
|---|----|
| รูปที่ 1 ภาพรวมของกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ [11] | 7 |
| รูปที่ 2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน [13] | 10 |
| รูปที่ 3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับ (Adsorption) และ การดูดซึม (Absorption) [14] | 11 |
| รูปที่ 4 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ [15]..... | 11 |
| รูปที่ 5 แบบจำลองกลไกการดูดซับ 4 ขั้นตอน [18]..... | 14 |
| รูปที่ 6 ประเภทสีทาอาคารแบ่งตามลักษณะพื้นผิวที่ทา (ก) สีน้ำอะคริลิก (ข) สีย้อมไม้ (ค) สีกันสนิม (ง) สีรองพื้นผิวปูน..... | 18 |
| รูปที่ 7 กระบวนการผลิตสี [29]..... | 23 |
| รูปที่ 8 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) และหน้าจอกำหนดโปรแกรม (Block Diagram) [31]... | 24 |
| รูปที่ 9 ลำดับการทำงานของ LabVIEW [30]..... | 24 |
| รูปที่ 10 ระบบ DAQ ของการทำงานของเครื่องวิเคราะห์เสียงผ่านโปรแกรม LabVIEW [32] | 25 |
| รูปที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [34] | 26 |
| รูปที่ 12 แบบร่างอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบ..... | 36 |
| รูปที่ 13 อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบเมื่อสร้างเสร็จแล้ว | 36 |
| รูปที่ 14 แบบร่างโครงสร้างลักษณะกล่องใส่อุปกรณ์ตรวจวัด..... | 37 |
| รูปที่ 15 แบบร่างลักษณะภายในกล่องใส่อุปกรณ์ตรวจวัดและตำแหน่งการวางเซนเซอร์ | 37 |
| รูปที่ 16 แบบร่างตำแหน่งการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด..... | 38 |
| รูปที่ 17 ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสีทาอาคาร | 39 |
| รูปที่ 18 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) ของการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า | 41 |
| รูปที่ 19 หน้าจอแสดงผล (Front panel) ของการวัดอุณหภูมิขาเข้า-ขาออก | 42 |
| รูปที่ 20 หน้าจอแสดงผล (Front panel) ความดันและอัตราการไหล | 42 |
| รูปที่ 21 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) ของความชื้น..... | 43 |

| | | |
|-----------|---|----|
| รูปที่ 22 | ลักษณะการทาสีบนกระดาษชานอ้อย | 44 |
| รูปที่ 23 | แบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีแบบ 3 มิติ..... | 52 |
| รูปที่ 24 | กราฟความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ทางเข้าและทางออกของการทดสอบกระดาษ ที่ไม่ผ่านการเคลือบสี..... | 61 |
| รูปที่ 25 | ลักษณะสีด้าน (Paint1) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ | 66 |
| รูปที่ 26 | ลักษณะสีกึ่งเงา (Paint2) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ | 66 |
| รูปที่ 27 | ลักษณะสีเงา (Paint3) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ | 66 |
| รูปที่ 28 | สี Paint4 หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ | 69 |
| รูปที่ 29 | สี Paint5 หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ | 69 |
| รูปที่ 30 | ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ | 71 |
| รูปที่ 31 | ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีที่ผสมสารดูดซับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อแก๊สที่ผ่านน้ำและไม่ผ่านน้ำ ที่อัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส | 72 |
| รูปที่ 32 | ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ผสมสารดูดซับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก แบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ (ค) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส | 75 |
| รูปที่ 33 | การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวกระดาษจำลองเมื่อคิดจากทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยา กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองที่เวลาจำลองเท่ากับ 21 วินาที..... | 81 |
| รูปที่ 34 | คอนทัวร์อุณหภูมิบนกระดาษจำลองแต่ละชั้นที่เวลาจำลอง 21 วินาที (ก) อุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 1 (ข) อุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 2 (ค) อุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 3 และ (ง) อุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 4..... | 81 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมลพิษต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แก๊สมีเทน (CH_4), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และฝุ่นละอองต่าง ๆ ยังคงมีการสะสมปริมาณเพิ่มมากขึ้น [1] เนื่องจากการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจ การขนส่งและอุตสาหกรรม รวมถึงเทคโนโลยีทันสมัยที่ตอบสนองความต้องการและความสะดวกสบายของมนุษย์มากกว่าในอดีต อีกทั้งมีการตัดไม้ ทำลายป่า ซึ่งเปรียบเสมือนเครื่องฟอกอากาศของโลก ส่งผลให้ในบรรยากาศกลายเป็นแหล่งสะสมของมลพิษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสะสมตัวเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่สมัยหลังยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม จนก่อให้เกิดเป็นภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) นานาชาติตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้ริเริ่มแนวคิดการแก้ไขปัญหานี้มาอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2540 พิธีสารเกียวโตเป็นหนึ่งในความพยายามระดับนานาชาติเพื่อแก้ปัญหาโลกร้อน และข้อตกลงนานาชาติที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี พ.ศ. 2558 นานาชาติได้ร่วมลงนามกันภายใต้ความตกลงปารีส (Paris Agreement) ซึ่งมีประเด็นสำคัญ คือ การควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวโลกไม่ให้เพิ่มขึ้นเกิน 2 องศาเซลเซียสจากระดับอุณหภูมิช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรม และพยายามจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1.5 องศาเซลเซียสจากระดับอุณหภูมิช่วงก่อนยุคอุตสาหกรรม [2] แม้ว่านานาชาติจะร่วมกันทำข้อตกลงลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ประเทศมหาอำนาจอย่างสหรัฐอเมริกาและจีนยังคงมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่น ๆ [3] [4] เนื่องจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณมาก ซึ่งดูเหมือนว่าจะส่งผลให้เกิดการสะสมอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเกิดวิกฤตและภัยพิบัติต่างๆ มากมาย ก่อให้เกิดผลเสียต่อภาคเศรษฐกิจ เกิดผลกระทบต่อภาคส่วนต่าง ๆ อาทิ ภาคเกษตรกรรม ภาคสังคมและสิ่งแวดล้อม จากการหยุดกิจกรรมของมนุษย์เนื่องจากโรคระบาดโควิด 19 พบว่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกมีปริมาณที่ต่ำกว่าปีก่อนหน้านั้น [5] แม้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็ป็นสัญญาณที่ทำให้นานาชาติ โดยเฉพาะประเทศมหาอำนาจทั้งหลายตระหนักถึงการลดลงของการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ธรรมชาติเกิดขึ้นได้ถ้าจริงจัง หลังเศรษฐกิจกลับมาฟื้นตัวจากผลกระทบโรคโควิด-19 ประธานาธิบดีสี จิ้นผิงของประเทศจีนประกาศว่าประเทศจีนจะลดการปล่อย

คาร์บอนไดออกไซด์ลงเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2603 [6] และกลุ่มผู้นำด้านอุตสาหกรรมหลักของโลก 7 ประเทศ (G7) ประกาศลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมลงครึ่งหนึ่งในช่วง 2 ทศวรรษ จนถึงปี พ.ศ. 2573 รวมถึงมุ่งสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีหมุนเวียนและยั่งยืน [7] จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้นานาประเทศมีการแข่งขันกันในการศึกษา คิดค้น และพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ช่วยในการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) อีกทั้งการพัฒนาหน่วยปฏิบัติการที่ช่วยในการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage units) เพื่อลดการปลดปล่อยและนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้งานต่อในกระบวนการอื่น

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture technology) ที่ได้มีการพัฒนาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โรงงานขนาดใหญ่ หรือ โรงไฟฟ้า เพื่อลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศไม่ให้มากเกินไป ซึ่งจะนิยมใช้เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) [8] อาทิ การดูดซับ (Adsorption) โดยเฉพาะการดูดซับโดยใช้ของแข็งประเภทเกลือคาร์บอเนต เพราะ มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง หาง่าย ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [9] นอกจากนี้ นักวิจัยยังพยายามหาวิธีในการพัฒนาและฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากที่สุด และพยายามสร้างที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำมาใช้งานต่อ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเพราะต้องใช้ต้นทุนสูง รวมถึงต้องเป็นสถานที่ ๆ เหมาะสมในการกักเก็บด้วย เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโมเลกุลขนาดเล็กสามารถรั่วไหลได้ง่าย

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากภาคอื่น ๆ โดยเฉพาะภาคการขนส่ง เศรษฐกิจ และที่อยู่อาศัย ด้วยสาเหตุนี้เอง เพื่อที่จะช่วยลดปริมาณและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในบรรยากาศ ทางทีมวิจัยของ ดร.อาร์มสตรอง จึงได้เสนอแนวคิด “สีอัจฉริยะ (Smart paint)” ที่สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เข้าไปในสี และเติมแกรฟีน (Graphene) เพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของสีด้วย ส่งผลให้สีชนิดนี้มีราคาที่เหมาะสมและจำกัดอยู่เฉพาะกลุ่มยุโรปบางกลุ่มเท่านั้น [10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแนวคิดเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งมาประยุกต์และพัฒนาต่อยอดกับสีทาอาคาร เนื่องจากเล็งเห็นว่าปัจจุบันปริมาณตึกอาคารมีจำนวนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หากอาคารเหล่านี้สามารถช่วยทำหน้าที่ทดแทนต้นไม้ที่มี

ปริมาณลดลง โดยการเปลี่ยนผนังอาคารให้เสมือนเป็นต้นไม้จำลองที่ช่วยกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้ นอกจากจะช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศแล้ว ยังสามารถกักเก็บได้โดยไม่ต้องสร้างสถานที่เพิ่มเติม แนวคิดนี้จะกลายเป็นนวัตกรรมใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และประชาชนทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ อีกทั้งผลงานนี้จะช่วยแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มมูลค่าของสีด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารดูดซับของแข็งลงในสีทาอาคาร เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
2. ศึกษาความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสีทาผนังที่เตรียมขึ้นในภาวะต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ อุณหภูมิ ความชื้น และอัตราการไหลของอากาศผสมคาร์บอนไดออกไซด์
3. พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังที่เคลือบด้วยสีที่ทำการปรับปรุงสมบัติการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่เตรียมขึ้น เพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมสารดูดซับของแข็งกับองค์ประกอบหลักภายในเนื้อสี ได้แก่ CaCO_3 , TiO_2 และ Al_2SiO_3 โดยกำหนด อัตราส่วนสารดูดซับของแข็งต่อปริมาณสี ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนขององค์ประกอบ $\text{CaCO}_3/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_3$ ต่อปริมาณสีไม่เกินร้อยละ 20/20/10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (อ้างอิงจากสัดส่วนของสีทั่วไป) จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์กับสัดส่วนการผสมแบบต่าง ๆ
2. ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับทดสอบความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่พัฒนาขึ้น โดยเครื่องมือดังกล่าวสามารถปรับภาวะที่ต้องการ อันได้แก่ อัตราการป้อนอากาศ อุณหภูมิ และความชื้น โดยเครื่องมือทดสอบจะเป็น กล่องทดสอบ (Testing chamber) ขนาดภายในมีความกว้าง 149 มิลลิเมตร ความยาว 230 มิลลิเมตร ความสูง 100 มิลลิเมตร วางระบบวาล์ว ท่อ เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นอัตราการไหลของอากาศ และเครื่องปรับอุณหภูมิแก๊ส

3. ศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อสีที่เตรียมขึ้นต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ภาวะดำเนินการ ได้แก่ อุณหภูมิ (30 – 50 องศาเซลเซียส) ความเร็วของแก๊ส (100 – 1000 มิลลิลิตรต่อนาที) และความชื้น (ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 30 – 60)
4. สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผนังอาคารจำลองที่มีสีทาผนัง และศึกษาตัวแปรกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของแก๊ส และความชื้น ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ สีทาผนังอาคาร ตัวดูดซับของแข็ง แบบจำลองจลนพลศาสตร์ และกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สัดส่วนการผสมสารดูดซับของแข็งในสีทาผนังอาคารทั่วไปที่แสดงสมรรถนะการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม และได้ข้อมูลการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารที่มีภายใต้ภาวะดำเนินการต่าง ๆ

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ “สีอัจฉริยะ (Smart paint)” อาทิ คุณสมบัติของสี ส่วนประกอบของสี ปัจจัย ตัวแปร และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เกลือคาร์บอเนต และศึกษาสมดุลเคมีระหว่างเกลือคาร์บอเนตกับคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นทำการทดลองเบื้องต้นระหว่างเกลือคาร์บอเนตกับสีทาอาคาร
2. ออกแบบสัดส่วนของสีที่ใช้ในการทดลองร่วมกับบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) เพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมสีที่มีสารดูดซับของแข็งเป็นองค์ประกอบกับองค์ประกอบของสี โดยกำหนดสัดส่วนของสีพื้นฐานเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบ $\text{CaCO}_3/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_3$ ต่อปริมาณสีไม่เกินร้อยละ 20/20/10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และสัดส่วนของสารดูดซับของแข็งไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
3. ออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่

- 3.1. กล้องทดสอบ (Testing chamber)
- 3.2. ระบบควบคุมปริมาณแก๊สขาเข้ากล้องทดสอบ
- 3.3. เครื่องปรับอุณหภูมิแก๊ส
- 3.4. อุปกรณ์วัดความเร็วของแก๊ส
- 3.5. อุปกรณ์ตรวจวัด อุณหภูมิ และความชื้น ตามลำดับ
- 3.6. อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ รุ่น K-30 10%

CO₂ Smart Sensor

Specifications Measurement range: 0 – 10%

Accuracy: +/- 300 ppm at STP

Operating conditions: 0°C to 50°C, 0 to 95% RH

- 3.7. หน่วยประมวลผลข้อมูลที่มาจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ

จากนั้นประกอบและทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นกับอุปกรณ์เกี่ยวข้องอื่น ๆ

4. นำตัวอย่างสีที่เตรียมทั้งหมดจากข้อ 2 มาทดสอบวัดความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการทาสีลงบนกระดาษให้เต็มพื้นที่ของกระดาษทั้งด้านหน้าและหลัง ซึ่งเว้นขอบทั้ง 3 ด้าน ด้านละ 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทดสอบ โดยกำหนดภาวะของแก๊สขาเข้าอุปกรณ์ทดสอบ ดังนี้ (1) อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วงระหว่าง 100 - 1000 มิลลิลิตรต่ออนาที (2) อุณหภูมิของแก๊สอยู่ในช่วงระหว่าง 30 - 50 องศาเซลเซียส และ (3) ความชื้นของแก๊สอยู่ในช่วงระหว่าง ความชื้นสัมพัทธ์ 30 - 60% ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลจากอุปกรณ์วัดเหล่านี้ ไปวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการผสมกับความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
5. นำสัดส่วนสีที่ดีที่สุดจากผลของความสัมพันธ์ข้อ 4 มาทดสอบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ภาวะดำเนินการต่าง ๆ โดยการเปลี่ยน อุณหภูมิของแก๊สขาเข้า และความเร็วของแก๊ส และสร้างจลพลศาสตร์สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
6. สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ บนผนังอาคารที่มีการเคลือบด้วยสีที่มีการผสมสารดูดซับของแข็งแล้ว ขนาดเท่ากับเครื่องที่ใช้ในการทดลองเป็น ความกว้าง 149 มิลลิเมตร ความยาว 230 มิลลิเมตร ความสูง 100 มิลลิเมตร โดยจะใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT และจลนพลศาสตร์จากข้อ 5 ในการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองและจะแสดงรูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังคอนกรีตที่มีการเคลือบด้วยสีที่มีการผสมสารดูดซับของแข็งเปรียบเทียบกับผลการทดลองในข้อ 5

7. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง อภิปราย และเขียนนิทานนิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทฤษฎีพื้นฐานของการดูดซับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สีทาผนัง อาคาร องค์ประกอบของสี หลักการทำงานของสี กระบวนการผลิตขั้นพื้นฐาน โปรแกรม LabVIEW และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การสร้างเครื่องที่ใช้ในการทดลอง การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

บทที่ 4 ผลการทดลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีเมื่อมีการเติมสารดูดซับ การวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีเทียบกับการทดลอง

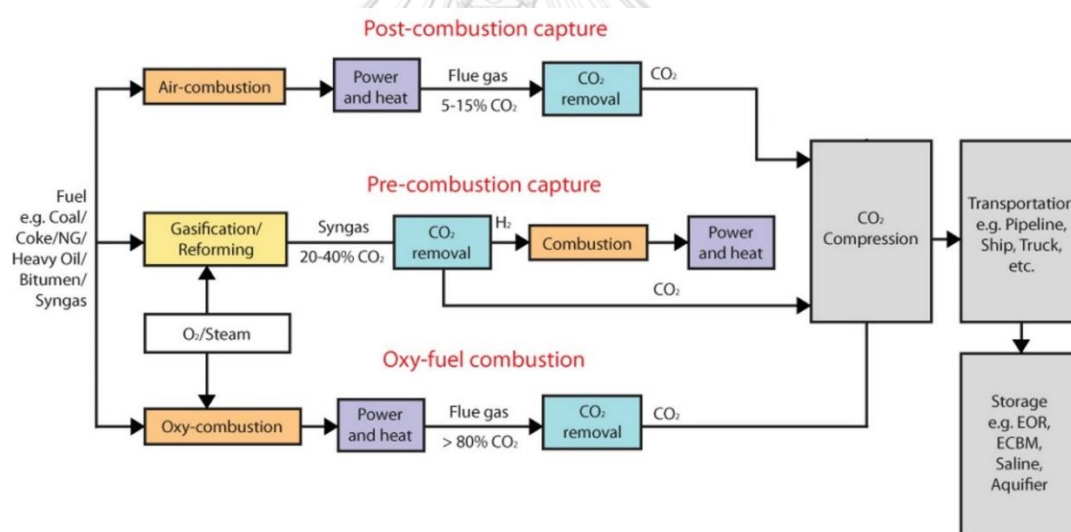
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture) เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นตามแนวคิดของการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon capture and storage (CCS)) เพื่อใช้ในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเสียจากกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปลดปล่อยแก๊สสู่ชั้นบรรยากาศ เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จึงถูกพัฒนาขึ้นโดยแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้ กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture) กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion) และการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture) ดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพรวมของกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ [11]

2.1.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

กระบวนการที่ใช้ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ เริ่มจากการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นแก๊ส (Gasification) ซึ่งเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนในเครื่องแก๊สสังเคราะห์ (Gasifier) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) กระบวนการนี้จะเกิดภายใต้ภาวะอุณหภูมิ

และความดันสูง จากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เรียกว่า Water gas shift จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 15 – 50 และแก๊สไฮโดรเจน กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้จะช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้ในส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะกลายเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่สามารถนำไปใช้งานต่อไป [12]

2.1.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion)

กระบวนการนี้จะใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ ซึ่งจะต้องมีกระบวนการแยกออกซิเจนออกจากอากาศ (Air separation unit) ให้กลายเป็นแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 90 – 95 ไอน้ำ และแก๊สอื่น ๆ [12]

2.1.3 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

กระบวนการนี้ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังผ่านกระบวนการเผาไหม้เสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ของแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ข้อดีของกระบวนการนี้ คือการดักจับหลังการเผาไหม้จะไม่กระทบต่อกระบวนการต้นทางของทั้งระบบ กระบวนการสามารถต่อเติมจากกระบวนการที่มีอยู่เดิมได้และมีความซับซ้อนน้อย ซึ่งจะต่างจากกระบวนการอื่นที่ต้องมีการออกแบบและวางระบบก่อนสร้าง อีกทั้งมีความซับซ้อนมากกว่า หากกระบวนการไม่สามารถใช้ได้ ก็จะไม่สามารถดำเนินระบบต่อได้ นอกจากนี้การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถประยุกต์ในงานต่าง ๆ ได้หลากหลาย โดยเฉพาะกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำในบรรยากาศ [12]

2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

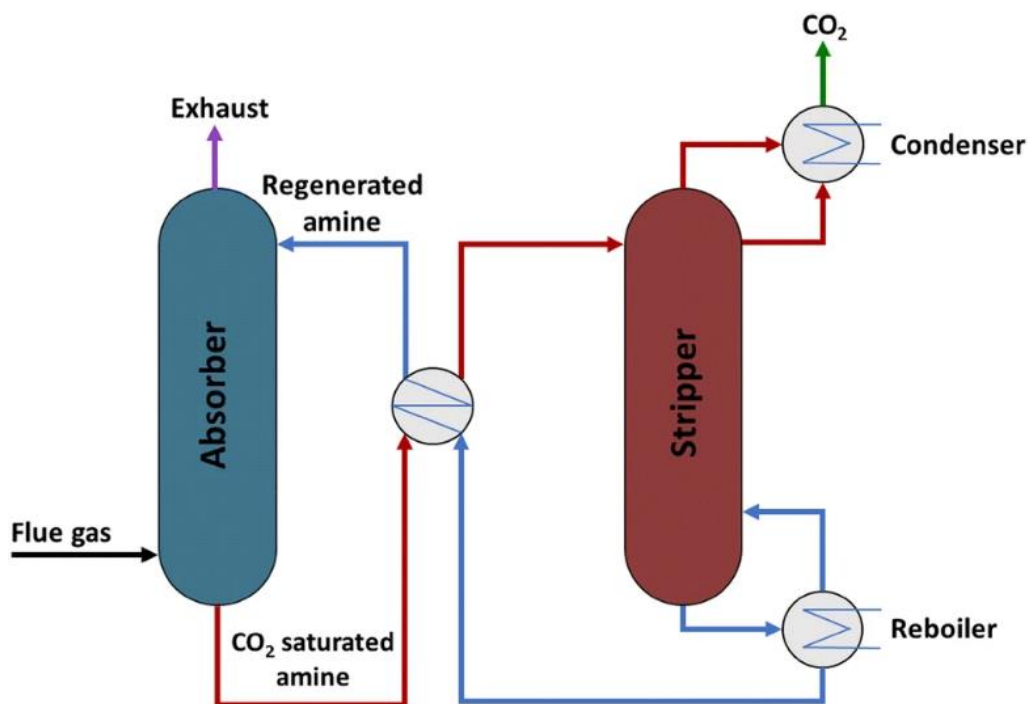
เทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มีหลากหลายวิธี โดยเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งเป็น 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการดูดซึม (Absorption process) กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) และ กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation process)

2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption process)

กระบวนการดูดซึมเป็นกระบวนการเกี่ยวกับการถ่ายเทองค์ประกอบจากวัฏภาคแก๊สสู่วัฏภาคของเหลว เมื่อทั้งสองวัฏภาคเกิดการสัมผัสกันโดยมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นแรงขับ (Driving force) ให้เกิดการดูดซึมจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล อีกทั้งเกิดกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic process) ขึ้นด้วย ในกระบวนการดูดซึมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) และ การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption)

การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) เป็นการดูดซึมที่ไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างองค์ประกอบในวัฏภาคของแก๊สและของเหลว โดยองค์ประกอบในวัฏภาคหนึ่งจะแพร่สู่อีกวัฏภาคหนึ่งระหว่างพื้นผิวสัมผัส และซึมเข้าไปในตัวของสารดูดซึม ซึ่งการดูดซึมจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดันของระบบ อย่างไรก็ตาม หากองค์ประกอบที่ต้องการแยกมีปริมาณที่ต่ำ การดูดซึมทางกายภาพอาจไม่เพียงพอ จึงต้องพึ่งการดูดซึมโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีแทน เรียกว่า การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) ที่จะต้องใช้สารดูดซึมที่สามารถทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซึมได้ โดยปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นผิวสัมผัสของทั้งสองวัฏภาค หรือเกิดในวัฏภาคของสารดูดซึม ซึ่งสารดูดซึมที่นิยมใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม คือ สารละลายเอมีน

จากรูปที่ 2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีน เป็นกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมหลังการเผาไหม้ โดยป้อนแก๊สผสมหลังการเผาไหม้เข้าที่ด้านล่างของหอดูดซึม (Absorber) ในลักษณะการไหลแบบสวนทางกับสารละลายเอมีนเพื่อให้เกิดการดูดซึม แก๊สผสมหลังผ่านการดูดซึมแล้วจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงและถูกปล่อยออกบริเวณด้านบนของหอดูดซึม ส่วนสารละลายเอมีนที่อิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปที่หอคืนสภาพ (Stripper) เพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลายเอมีนให้กลับมาใช้ได้ใหม่ และได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์สูงไปใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป ข้อดีของกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน คือมีประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์สูง สามารถนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ และคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ สารละลายเอมีนระเหยง่ายและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานในการฟื้นฟูค่อนข้างมาก รวมถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดำเนินการ และซ่อมบำรุงค่อนข้างสูง



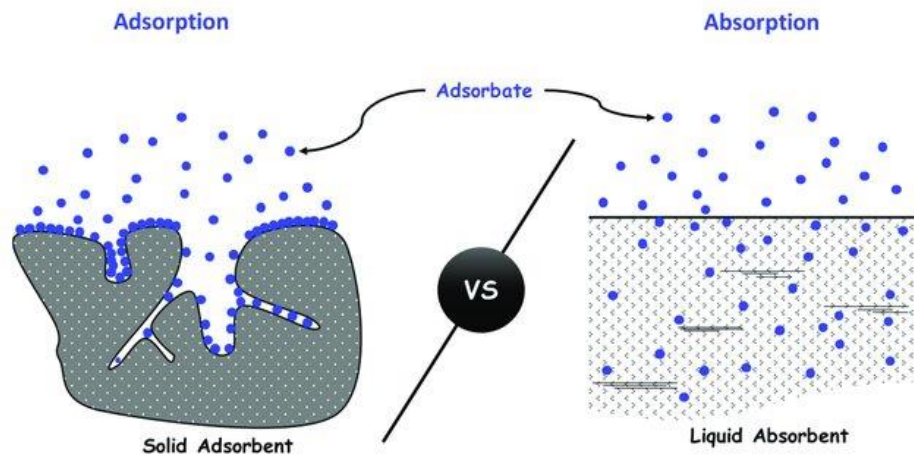
รูปที่ 2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน [13]

2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

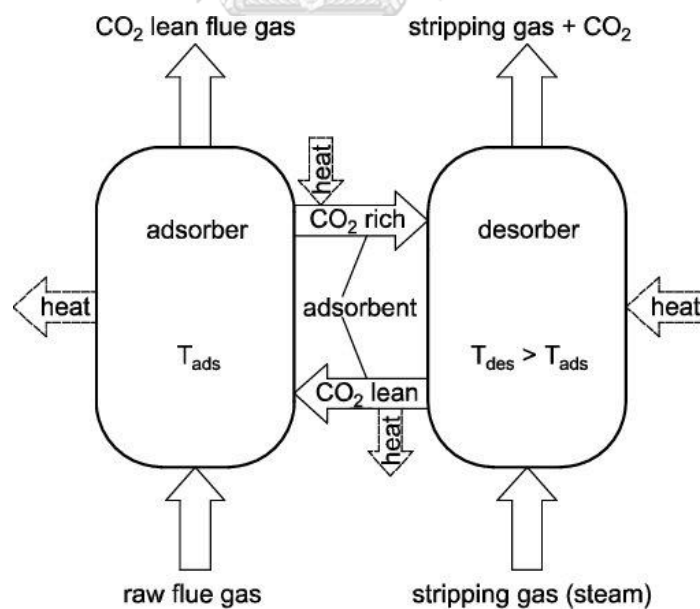
กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการเกี่ยวกับการถ่ายเทองค์ประกอบของวัฏภาคแก๊สไปยังวัฏภาคของแข็ง โดยจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของของแข็ง เมื่อองค์ประกอบของแก๊สถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งจะเกิดลักษณะการดูดซับคล้ายกับการดูดซึม กล่าวคือ สามารถเกิดทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี แต่การดูดซับจะเกิดบริเวณผิวสัมผัสของแข็งหรือในรูพรุนของตัวดูดซับเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซึมดังแสดงในรูปที่ 3 อีกทั้งการดูดซับทางเคมีจะเกิดการปลดปล่อยพลังงาน (Exothermic) ออกมาด้วย สารดูดซับที่นิยมใช้จะเป็นสารที่มีปริมาณรูพรุนสูง เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieves) เป็นต้น

กระบวนการดูดซับประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ หอดูดซับ (Adsorber) และหอคืนสภาพ (Desorber) ดังรูปที่ 4 โดยแก๊สผสมหลังการเผาไหม้จะถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับด้านล่าง และเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับของแข็งที่ถูกบรรจุอยู่ในหอดูดซับ แก๊สผสมที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงและถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ ส่วนสารดูดซับของแข็งที่อิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำมาฟื้นฟูที่หอคืนสภาพด้วยการให้ความร้อนหรือลดความดันก่อนจะนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ โดยภาวะในการดำเนินการจะแตกต่างกันตามชนิดของสารดูดซับที่นำมาใช้ใน

กระบวนการ ข้อดีของกระบวนการดูดซับ คือเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้โดยใช้พลังงานในการฟื้นฟูต่ำกว่าแบบอื่น และสารดูดซับเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกระบวนการดูดซับคือ สารดูดซับของแข็งให้ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าใช้สารละลายดูดซับ



รูปที่ 3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับ (Adsorption) และการดูดซึม (Absorption) [14]



รูปที่ 4 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ [15]

2.2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation process)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรน (Membrane) ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Selective barrier) ที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการแยกผ่านไปได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้จะมีความเฉพาะเจาะจงต่อชนิดของแก๊ส เช่น เมมเบรนชนิดมีรูพรุน (Porous membrane) เมมเบรนชนิดพอลิเมอร์ (Polymeric membrane) คาร์บอน (Porous carbon) และเมมเบรนชนิดเซรามิก (Microporous membrane) เป็นต้น เมื่อแก๊สผสมหลังการเผาไหม้ถูกป้อนผ่านเมมเบรน ตัวเมมเบรนจะเลือกเฉพาะแก๊สบางส่วนให้ผ่านไป โดยกระบวนการแพร่ (Diffusion) ที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น ความดันย่อย สนามไฟฟ้าหรืออุณหภูมิ เป็นแรงขับ (Driving force) ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกเคลื่อนที่แพร่ผ่านเมมเบรนได้ ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถแยกแก๊สที่ปริมาณน้อย ๆ ได้ รวมถึงสามารถออกแบบระบบให้มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย แต่กระบวนการนี้ต้องใช้ต้นทุนสูงและมีอายุการใช้งานของเมมเบรนค่อนข้างสั้น

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) สูงจะไม่เกิดการดูดซับ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะเกิดการดูดซับได้ เมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับ (Adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น รวมถึงการกระจายตัวของสารดูดซับบริเวณที่ผิวและภายในวัฏภาคก็ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับสามารถบอกประเภทของการดูดซับได้ กล่าวคือ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) จะเรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และถ้าเป็นแรงยึดเหนี่ยวของพันธะเคมี จะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ เนื่องจากเป็นการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้จะให้พลังงานการคายความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ คือ มีค่าต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล ทำให้สามารถเกิดการผันกลับของ

กระบวนการได้ง่าย (Reversibility) ขึ้นกับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับ การดูดซับทางกายภาพจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิบรรยากาศ และจะเกิดได้ดีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ นอกจากนี้สารดูดซับสามารถเกิดซ้อนทับกันได้หลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับและจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของสารดูดซับในสารละลาย [16]

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับพันธะเคมี เช่น พันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ระหว่างสารดูดซับและสารดูดซับ ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้โมเลกุลใหม่เพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับชนิดนี้จะเกิดได้ดีหรือเร็วที่อุณหภูมิสูงและจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ในทางกลับกันการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับก็จะทำได้ยากเช่นกัน เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายพันธะเคมี [17] โดยข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

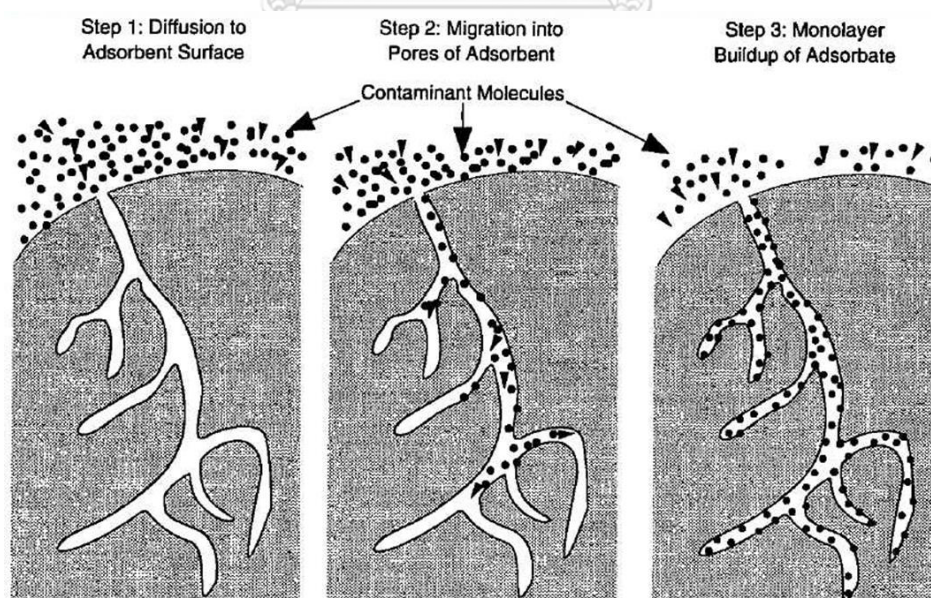
ตารางที่ 1 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [17]

| ตัวแปรการดูดซับ | การดูดซับทางกายภาพ | การดูดซับทางเคมี |
|-------------------------------|--|--|
| 1.ค่าความร้อนของการดูดซับ | เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น มวลโมเลกุลและสภาพผิว ปกติคือช่วง 5 - 40 กิโลจูล/โมล | มีช่วงกว้าง เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะเคมี ปกติจะอยู่ในช่วง 40 - 400 กิโลจูล/โมล |
| 2.อุณหภูมิของการดูดซับ | ต่ำ (ประมาณจุดเดือดของ Adsorbate) | สูง (แต่โมเลกุลที่ดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพจะเกิดเพียงช่วงสั้น) |
| 3.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล | แรงแวนเดอร์วาลส์ | พันธะเคมี |
| 4.การผันกลับของปฏิกิริยา | ผันกลับได้ (โดยลดความดันทำให้แก๊สที่ถูกดูดซับหลุดจากผิว) | ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ (อาจเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้น) |
| 5.การดูดซับบนแก๊สและของแข็ง | เกิดได้กับสารทุกชนิดเมื่อความดันและอุณหภูมิเหมาะสม | เกิดได้เฉพาะกับสารบางประเภทที่มีแนวโน้มเกิดสารประกอบได้ |
| 6.พลังงานก่อกัมมันต์ | ไม่เกี่ยวข้อง | เกี่ยวข้อง |
| 7.รูปแบบการเข้าถึงความอิ่มตัว | Monolayer และ/หรือ Multilayer | Monolayer |

2.3.2 กลไกการดูดซับ

การทำงานของระบบดูดซับสาร ซึ่งอาศัยการสัมผัสระหว่างวัฏภาคของไหลและอนุภาคของสารดูดซับในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับไปยังตำแหน่งของการดูดซับซึ่งอยู่ในรูพรุนของสารดูดซับ โดยกลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การแพร่ภายนอก (External diffusion)** เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับจากพื้นที่ภายนอกมายังสารดูดซับ โดยบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับจะมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ ซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ
2. **การแพร่ภายใน (Internal diffusion)** เป็นขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคที่สารถูกดูดซับเคลื่อนที่จากชั้นของเหลวผ่านเข้าไปยังช่องว่าง (Porous) ภายในสารดูดซับ ไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปการแพร่จะมีสองกลไก ได้แก่ การแพร่ไปตามช่องว่างของรูพรุน (Pore diffusion) และการแพร่ไปตามพื้นผิวของรูพรุน (Surface diffusion)
3. **การดูดซับ (Adsorption)** เป็นขั้นตอนที่เกิดปฏิกิริยาการดูดซับ โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะติดที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วกว่าการแพร่ [17] ซึ่งแบบจำลองกลไกการดูดซับทั้ง 3 ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองกลไกการดูดซับ 4 ขั้นตอน [18]

2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

1. การถูกรบกวนของของเหลว

จากกลไกของการดูดซับชั้นแรกที่สารถูกดูดซับจะต้องผ่านคือ แผ่นฟิล์มของเหลว (Hydrodynamic boundary layer) ซึ่งอัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านชั้นฟิล์มของเหลวที่ล้อมรอบสารดูดซับ กล่าวคือ ถ้าการไหลมีความปั่นป่วนต่ำ ชั้นฟิล์มจะไม่ถูกรบกวน จะส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีความหนามากขึ้น กลายเป็นอุปสรรคในการแทรกผ่าน ชั้นนี้ของโมเลกุลสารถูกดูดซับ และการเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มจะกลายเป็นตัวกำหนดอัตราของการดูดซับด้วย ในทางตรงกันข้าม หากการไหลมีความปั่นป่วนสูงจนชั้นฟิล์มของเหลวไม่สามารถสะสมตัวเป็นฟิล์มหนาได้ จะส่งผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวเข้าไปหาสารดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ซึ่งกรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างของสารดูดซับจะเป็นตัวกำหนดอัตราของการดูดซับ

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

อัตราเร็วของการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของการดูดซับจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้ดีกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของสารดูดซับมาก เพราะแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด ส่งผลให้โมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนจะมีโอกาสเข้าไปในรูพรุนได้มากกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

4. อุณหภูมิของระบบ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากถ้ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดอุณหภูมิของระบบ แต่จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในทางตรงกันข้าม หากกระบวนการเป็นแบบดูดพลังงาน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงเมื่อมีการลดอุณหภูมิ นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

5. ค่า pH ของสารละลาย

ค่า pH ของสารละลายส่งผลต่อความเป็นขั้วบนผิวของสารดูดซับ กล่าวคือเมื่อค่า pH สูง จะมีประจุลบที่ผิวของสารดูดซับมากกว่าประจุบวก ส่วนค่า pH ต่ำจะส่งผลให้มีประจุบวกที่ผิวของสารดูดซับมากกว่า ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน

6. ระยะเวลาที่สารถูกดูดซับสัมพันธ์กับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Rate of desorption) ณ เวลานี้จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับมากที่สุด จากนั้นค่าจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป

2.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับขึ้นกับ 2 ปัจจัย ได้แก่ ประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ และ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยการศึกษาประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะพิจารณาปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้หรือความสามารถในการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ แต่จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและระยะเวลาของกระบวนการที่เกิดขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลอง 3 แบบเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's model)

2.4.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) [19]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเกิดจากสมมติฐานที่ว่า อัตราการดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาเพียงตัวแปรเดียว โดยความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะคงที่ตลอดการดูดซับ และค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (k_1) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.2)$$

- เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที่⁻¹)
 q_t คือ ค่าความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

2.4.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) [19]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ กล่าวคือ อัตราการดูดซับของตัวดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งตัวแปร และขึ้นกำหนดอัตราการดูดซับ คือ ขั้นตอนการดูดซับซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ แสดงดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (2.4)$$

- เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที่⁻¹)

2.4.3 แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's model)

แบบจำลองอาฟรามิเป็นแบบจำลองที่มีการดัดแปลงจากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ด้วยการเพิ่มค่าคงที่ของอาฟรามิ (n_{av}) ซึ่งปกติค่าคงที่ของอาฟรามิจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 – 4 โดยแบบจำลองนี้ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก [20] แสดงดังสมการ (2.5)

$$q_t = q_e(1 - \exp(-(k_{av}t)^{n_{av}})) \quad (2.5)$$

- เมื่อ k_{av} คือ ค่าคงที่ของอาฟรามิ (นาที่⁻¹)
 n_{av} คือ เลขชี้กำลังของเวลาที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ

2.5 สีทาผนังอาคาร

2.5.1 ชนิดของสีทาผนังอาคาร [21]

ชนิดของสีทาผนังอาคารสามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบ ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการจำแนกสี การจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคารแบ่งตามพื้นผิวของวัสดุที่ทาสี และการจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคารแบ่งตามการใช้งาน

2.5.1.1 การจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคาร แบ่งตามพื้นผิวของวัสดุที่ทา

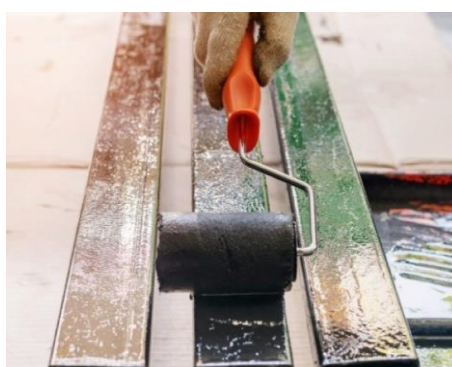
- สีน้ำอะคริลิก หรือ สีน้ำพลาสติก เป็นสีที่ใช้ในการทาสีผนังปูน คอนกรีต เพดาน
- สีน้ำมัน เป็นสีที่ใช้สำหรับทาเหล็ก และไม้
- สีย้อมไม้ เป็นสีที่ใช้ทาพวกไม้ต่าง ๆ ให้เห็นลายธรรมชาติของไม้ เช่น พวกละแคะเกอร์ เป็นต้น
- สีกันสนิม เป็นสีที่ใช้ทาเหล็ก จะทารองพื้นเพื่อกันสนิมก่อนทาสีจริง
- สีรองพื้นผิวปูนใหม่ หรือผิวปูนเก่า เป็นสีสำหรับเตรียมพื้นผิว สามารถลดความเป็นกรดหรือด่างของปูน ทำให้การยึดเกาะของการทาสีจริงมีประสิทธิภาพดีขึ้น



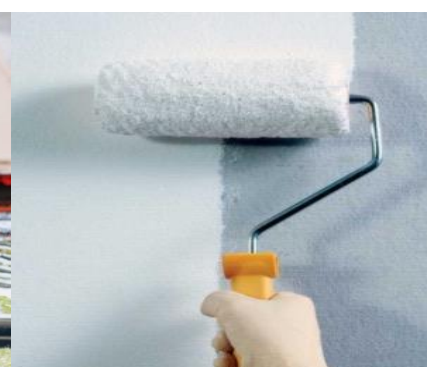
(ก) สีน้ำอะคริลิก [22]



(ข) สีย้อมไม้ [23]



(ค) สีกันสนิม [24]



(ง) สีรองพื้นผิวปูน [25]

รูปที่ 6 ประเภทสีทาอาคารแบ่งตามลักษณะพื้นผิวที่ทา

(ก) สีน้ำอะคริลิก (ข) สีย้อมไม้ (ค) สีกันสนิม (ง) สีรองพื้นผิวปูน

2.5.1.2 การจำแนกประเภทของสีทาผนังอาคารแบ่งตามการใช้งาน

- **สีน้ำมันหรือสีเคลือบเงา** เป็นสีที่ใช้ตัวทำละลายเป็นส่วนผสมหรือทำให้เงาฉาบ เช่น ทินเนอร์ ลงไปก่อนใช้ ซึ่งจะนิยมใช้กับงานเคลือบงานไม้ งานโลหะ เพื่อให้พื้นผิวมีความสวยงาม มีความเงางาม และช่วยรักษาสภาพพื้นผิวในคงทน
- **สีพลาสติกหรือสีอะคริลิก** สีชนิดนี้จะมีน้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อให้ลดความหนืดของสีก่อนใช้งาน เหมาะกับการทาสีงานปูน คอนกรีต และกระเบื้อง เพื่อให้เกิดสีมัน และการรักษาสภาพพื้นผิว สีชนิดนี้สามารถจำแนกออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ได้อีก 2 ประเภท ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสีทาภายนอกและสีทาภายใน [26]

| คุณสมบัติ | สีทาภายนอก | สีทาภายใน |
|--|------------|------------|
| ทนต่อสภาพอากาศแปรปรวน | สูง | ต่ำ |
| ทนต่อสภาพความร้อน รังสีความร้อน | สูง | ต่ำ |
| ความยืดหยุ่นในการปกปิดรอยแตกร้าว | สูง | ปานกลาง |
| ความสามารถในการป้องกันน้ำซึมผ่านพื้นผิวซีเมนต์ | ป้องกันได้ | ป้องกันได้ |
| เนื้อสีเป็นเงา ไม่จับฝุ่นง่าย | ใช่ | ใช่ |
| ความสามารถในการขัดหรือทำความสะอาดสิ่งสกปรกออกได้ง่าย | ใช่ | ใช่ |
| การป้องกันเชื้อรา ตะไคร่น้ำ และแบคทีเรีย | ป้องกันได้ | ป้องกันได้ |
| ระยะเวลาการใช้งาน | นานกว่า | สั้นกว่า |
| ราคา | สูง | ปานกลาง |

2.5.2 องค์ประกอบของสีทาผนังอาคาร

สีส่วนใหญ่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ดังนี้

1. สารยึดเกาะ (Binder)
2. ผงสี (Pigment) และ แป้งเพิ่มเนื้อ (Filler/Extender)
3. สารเติมแต่ง (Additive)
4. ตัวทำละลาย (Solvent)

2.5.2.1 สารยึดเกาะ (Binder: Latex / Resin)

สารยึดเกาะในสี ส่วนใหญ่จะเป็นสารจำพวกโพลีเมอร์หรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลยาว ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักให้กับสี ในการยึดจับมวลสารต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในชั้นฟิล์มสี ซึ่งความสามารถในการยึดเกาะของสารยึดเกาะแต่ละชนิดจะแตกต่างกันตามชนิดของสารยึดเกาะ

ปริมาณ ชนิดของผงสีหรือแป้งเพิ่มเนื้อและขนาดโมเลกุลของสาร การยึดเกาะที่ดีนั้น สารยึดเกาะจะต้องมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปบนพื้นผิวได้ดี

สารยึดเกาะที่นิยมใช้ ได้แก่

- Long oil alkyd ใช้ทำการผลิตสีน้ำมันสำหรับเคลือบไม้และเหล็ก
- Styrene-acrylic latex ใช้สำหรับการผลิตสีรองพื้นปูนใหม่ เพื่อกันความเป็นต่าง เนื่องจากสามารถทนทานต่อความเป็นต่างของพื้นผิวได้ดี
- Acrylic latex 100% ใช้สำหรับการผลิตสีทาทัບทุกประเภทเกรดคุณภาพสูง

2.5.2.2 ผงสี (Pigment) และ แป้งเพิ่มเนื้อ (Extender/Filler)

ผงสี (Pigment) มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ ทำให้เกิดความสวยงามและความแข็งแรงให้กับชั้นสี ก่อนการใช้งานสีเหล่านี้จะแขวนลอยอยู่ในเนื้อสี และจะติดอยู่ภายใต้ชั้นฟิล์มของโพลีเมอร์หลังจากสีแห้งตัวอย่างผงสีที่เติมในสีทั่วไป ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นผงสีที่ให้ความทึบแสงและเป็นสีขาว จึงนิยมใช้สำหรับสีที่ต้องการทำความสะอาดง่าย หรือสีที่ต้องทาเพื่อป้องกันพื้นผิว ไม่นั้นสีสน ส่วนสารประกอบอื่นที่นำมาทำเป็นผงสีสำหรับผสมสีให้เกิดสีสนแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผงสีประเภทสารประกอบอนินทรีย์ที่ใช้ในการผสมสี [27]

| สีที่แสดง | สารที่ใช้เป็นผงสี |
|-------------|---|
| สีดำ | Carbon (C) |
| สีขาว | Titanium dioxide (TiO_2), Antimony trioxide (Sb_2O_3), Zinc Oxide (ZnO) |
| สีม่วง | Cobalt (II) phosphate ($\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$) |
| สีน้ำเงิน | Ferric hexacyanoferrate ($\text{Fe}_7(\text{CN})_{18}$), Cobalt (II) aluminate (CoAl_2O_4) |
| สีฟ้า | Cobalt (II) stannate (Co_2SnO_4) |
| สีเขียวอ่อน | Chromium (III) oxide (Cr_2O_3) |
| สีเขียวแก่ | Hydrated chromium (III) oxide ($\text{Cr}_2\text{O}(\text{OH})_4$) |
| สีเหลือง | Cadmium sulfide (CdS), Lead chromate (PbCrO_4), Zinc chromate (ZnCrO_4) |
| สีส้ม | Cadmium selenide sulfide (Cd_2SSe) |
| สีแดง | Cadmium selenide (CdSe), Iron (III) oxide (Fe_2O_3) |

แป้งเพิ่มเนื้อ (Extender/Filler) ลักษณะจะเป็นเม็ดสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าผงสีมาก ส่วนใหญ่จะได้มาจากธรรมชาติ ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อสีในตัวสีให้มากขึ้น ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตสี อีกทั้งช่วยในการทาและการขัดให้เรียบง่ายขึ้น แต่ข้อจำกัดของการเติมแป้งเพิ่มเนื้อคือ ไม่สามารถเติมในปริมาณมากเกินไปได้ เพราะเป็นสารที่ได้มาจากธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่จึงอาจมีการปนเปื้อนของสารชนิดอื่นมาด้วย ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสีลดลงหรือคุณลักษณะของสีไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้น จึงมีการแยกเกรดของสีเพื่อกำหนดสัดส่วนในการเติมแป้งเพิ่มเนื้อโดยที่คุณภาพของสียังคงเป็นไปตามที่กำหนด ตัวอย่างของผงสีขาวประเภทเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate (CaCO_3)) และ Kaolinite (Aluminum-silicate ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$))

2.5.2.3 สารเติมแต่ง (Additive)

สารเติมแต่งเป็นสารที่ช่วยทำให้องค์ประกอบทั้งหมดในสีสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะช่วยปรับสภาพส่วนประกอบต่าง ๆ ของสีให้สามารถอยู่รวมตัวกันได้ ไม่เกิดการแยกชั้น หรือจับตัวเป็นก้อน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของสารเติมแต่งมีหลากหลาย เช่น ช่วยป้องกันการแข็งตัวของสีเมื่อถูกเก็บในสถานที่เย็นจัด ช่วยป้องกันเชื้อราหรือตะไคร่น้ำ หรือช่วยเรื่องความทนทานต่อแสงรังสียูวี เป็นต้น จะเห็นว่าการเติมสารเติมแต่งลงไปนสีจะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มความสามารถเฉพาะตัวสำหรับสีชนิดนั้น ๆ [21]

2.5.2.4 ตัวทำละลาย (Solvent)

ตัวทำละลายเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่ลดความหนืดของสีให้เหมาะสมกับอายุการจัดเก็บของสี และใช้ปรับความเงาให้เหมาะสมกับการใช้งาน การเลือกตัวทำละลายต้องเหมาะสมกับชนิดของสารยึดเกาะ กล่าวคือ การเลือกตัวทำละลายที่มีความสามารถในการละลายไม่เหมาะสมกับสารยึดเกาะ จะทำให้สีเกิดเป็นวุ้น หรือจับตัวเป็นก้อน และสีจะมีระดับความเงาที่ลดลง รวมถึงส่งผลต่อความสามารถในการแทรกซึมของสารยึดเกาะต่อผนังลดลง การยึดเกาะที่ผิวจะไม่ดี และเกิดการหลุดลอกของสีได้ง่าย ประเภทของตัวทำละลายมี 2 ประเภท ได้แก่ ตัวทำละลายที่เป็นน้ำ และตัวทำละลายที่เป็นสารเคมี การเข้ากันได้ของสีกับตัวทำละลายที่เลือกจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมต่อความสามารถในการละลายของเรซินได้ รวมถึงอัตราการระเหยของตัวทำละลายต้องเหมาะสม เพราะส่งผลต่อการเกิดฟิล์มสี [21]

2.5.3 เกรดของสี

เกรดของสีจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกปริมาณส่วนผสมของสารยึดเกาะและคุณภาพของสี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท [26] ดังนี้

- เกรด A เป็นสีที่มีสารยึดเกาะที่เป็นกลุ่มอะคริลิก 100% ซึ่งส่วนใหญ่จะนำเข้าจากยุโรป
- เกรด B เป็นสีที่มีสารยึดเกาะที่เป็นกลุ่มอะคริลิก 100% ซึ่งส่วนใหญ่จะนำเข้าจากทางเอเชีย
- เกรด C เป็นสีที่มีสารยึดเกาะที่เป็นกลุ่มอะคริลิคผสม
- เกรด D เป็นสีที่มีสารยึดเกาะที่เป็นกลุ่มอะคริลิคผสมในปริมาณน้อย

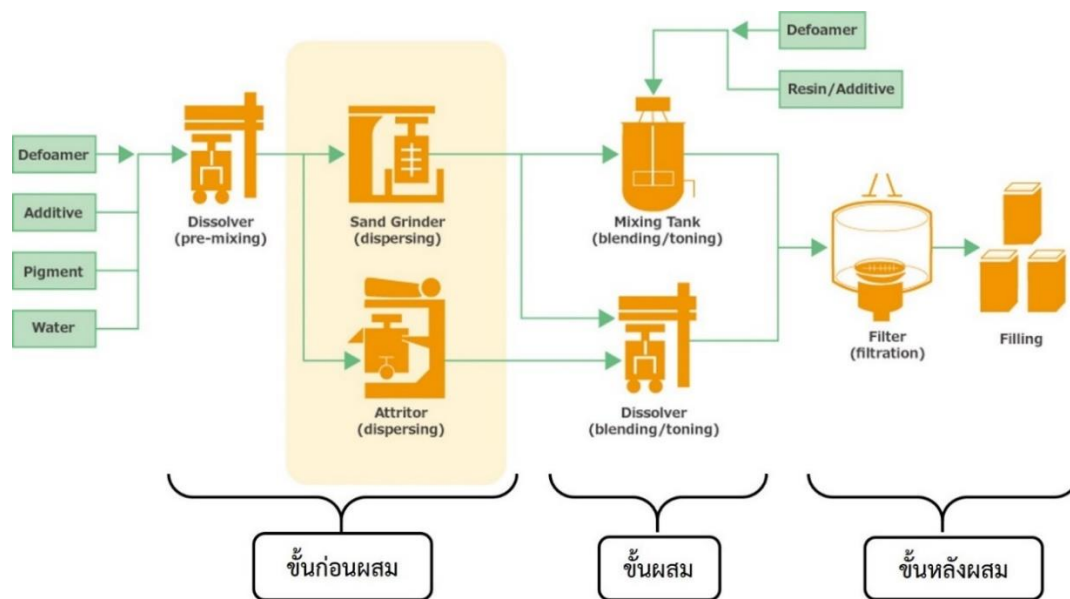
2.5.4 หลักการทำงานของสี

เมื่อทาสีลงบนพื้นผิววัสดุเรียบร้อยแล้ว น้ำจะเริ่มระเหยออกทำให้โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่เป็นสารยึดเกาะเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน และเมื่อน้ำระเหยออกหมดโพลิเมอร์เหล่านั้นจะกลายเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ เคลือบทับเม็ดสีให้ติดลงบนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สีมีลักษณะที่แข็ง ดังนั้นสำหรับการรักษาสภาพของสีเมื่อถูกเก็บไว้ในกระป๋อง การใส่สารเติมแต่งจึงมีความสำคัญมากในการปรับลักษณะของโพลิเมอร์และองค์ประกอบอื่น ๆ ไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน หรือแยกชั้นของสี [28]

2.5.5 กระบวนการผลิตสีขั้นพื้นฐาน

จากรูปที่ 7 แสดงกระบวนการผลิตสีประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [29] ดังนี้

- **ขั้นก่อนผสม** เป็นขั้นที่เตรียมองค์ประกอบต่าง ๆ ของสี (Semi-finished pigment) จากวัตถุดิบต้นให้มีลักษณะที่เหมาะสมตามสัดส่วน โดยจะทำการกวนให้เม็ดสีและองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ละลายในระดับหนึ่ง จากนั้นจะนำไปบดเพื่อทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ มีความละเอียด ขนาดอนุภาคเล็กลง และมีความกระจายตัวได้ดีมากยิ่งขึ้น
- **ขั้นผสม** นำองค์ประกอบที่เตรียมเรียบร้อยแล้วไปผสมในถังกวน โดยปรับสัดส่วนของสารยึดเกาะและสารเติมแต่ง เพื่อให้ได้สีตามคุณภาพที่ต้องการ
- **ขั้นหลังผสม** เป็นขั้นตอนการแยกสารปนเปื้อนออกจากสี บรรจุสีลงภาชนะ และจัดเก็บ



รูปที่ 7 กระบวนการผลิตสี [29]

2.6 โปรแกรม LabVIEW [30]

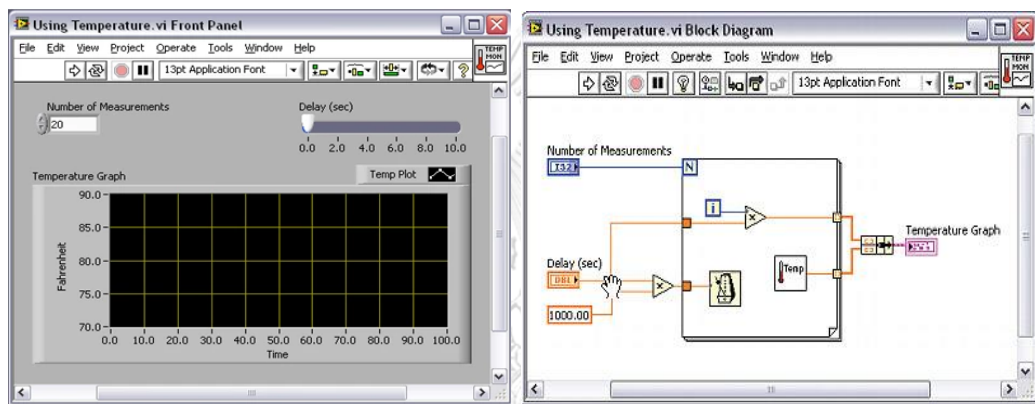
โปรแกรม LabVIEW หรือ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดเสมือน (Virtual Instrument, VI) สำหรับระบบการวัด, ทดสอบ, และควบคุมบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ โดยการเขียนโปรแกรมจะใช้ภาษาโค้ดรูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical language) แทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดอย่างภาษาพื้นฐาน เช่น C JAVA หรือ Python และมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการวาดแผนผังกระบวนการ (Flow chart) ที่เข้าใจง่าย ที่เหมาะกับการเขียนโปรแกรมที่ต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อใช้ในการวัดและควบคุมระบบทางวิศวกรรม นอกจากนี้ LabVIEW ยังมีชุดฟังก์ชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลในกรณีที่ต้องบันทึกข้อมูลตลอดเวลา

2.6.1 Data Flow and Programing

การเขียนภาษา G เป็นการเขียนโดยใช้หลักการของ Data Flow กล่าวคือเมื่อเริ่มส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม จะต้องกำหนดทิศทางไหลของข้อมูลว่า จะไปส่วนใด ผ่านการประมวลผลส่วนใด และแสดงผลอย่างไร ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเขียน Block Diagram

ในโปรแกรม LabVIEW จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- **Front Panel** คือ หน้าต่างเสมือนสำหรับผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถสร้างหน้าต่านี้ขึ้นเองได้ เพื่อเป็นช่องทางสื่อสารกับระบบที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและควบคุมการทำงานของกระบวนการที่กำลังศึกษา
- **Block Diagram** คือ หน้าต่างสำหรับให้ผู้ออกแบบระบบ เขียนโค้ดการทำงานของระบบโดยใช้รูปภาพและสร้างความเชื่อมโยงกันข้อมูลในระบบ ซึ่งเปรียบเสมือนฮาร์ดแวร์ภายในของเครื่องมือวัด

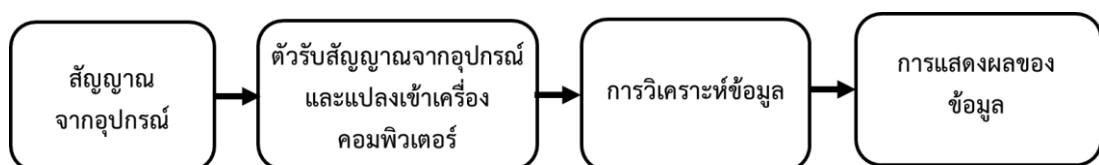


รูปที่ 8 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) และหน้าจอการเขียนโปรแกรม (Block Diagram) [31]

2.6.2 หลักการทำงานของ LabVIEW

หลักการทำงานของ LabVIEW แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

- ส่วนรับและแปลงสัญญาณ (Acquisition) เป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากอุปกรณ์ภายนอกเข้าสู่ระบบ เช่น DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า) เป็นต้น
- ส่วนวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis) เป็นส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับมาผ่านฟังก์ชันต่าง ๆ
- ส่วนการแสดงผล (Presentation) เป็นการแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น หน้าจอคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

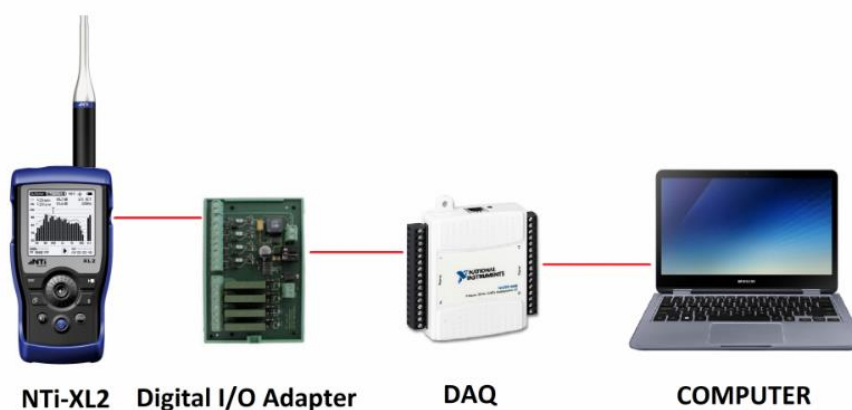


รูปที่ 9 ลำดับการทำงานของ LabVIEW [30]

2.6.3 ระบบ DAQ บน PC [32]

ระบบ DAQ หรือ Data acquisition เป็นกระบวนการในการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ ปรับคุณภาพสัญญาณ ประมวลผล แล้วนำไปเก็บไว้ในหน่วยความจำบนคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ จัดเก็บ หรือแสดงผล ซึ่งระบบ DAQ จะมีส่วนประกอบ 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนของแหล่งสัญญาณ ส่วนของฮาร์ดแวร์ Signal conditioning ส่วนอุปกรณ์ DAQ และส่วนของโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

สัญญาณที่ส่งออกมาจากตัวอุปกรณ์วัดค่าอาจเป็นสัญญาณอนาล็อก ($\pm 10V$ หรือ $4\sim 20mA$) สัญญาณดิจิทัล หรืออาจมาจากเซ็นเซอร์ โดยสัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งไปยัง Signal conditioning ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับปรุงสัญญาณให้เหมาะสมก่อนส่งไปยังกระบวนการประมวลผลใน DAQ เช่น หากช่วงสัญญาณกว้างเกินไป ก็ต้องลดช่วงสัญญาณให้แคบลง เป็นต้น ในส่วนของอุปกรณ์ DAQ โดยทั่วไปจะรับช่วงสัญญาณได้ที่ $\pm 10V$ เท่านั้น และจะแปลงข้อมูลที่ได้รับมาส่งเข้าคอมพิวเตอร์ในรูปแบบสัญญาณที่เหมาะสมกับตัวเครื่อง ดังนั้นคอมพิวเตอร์จะต้องติดตั้งพร้อมทั้งไดรฟ์เวอร์และโปรแกรมที่รองรับกับระบบนี้ด้วย ตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์เสียงผ่านการใช้โปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในรูปที่ 10 อุปกรณ์รับสัญญาณเสียงในรูปแบบความถี่ และมีการแปลงสัญญาณ รวมถึงเก็บข้อมูลความถี่ต่าง ๆ ใน Ni DAQ จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลผ่านทางโปรแกรม LabVIEW ในคอมพิวเตอร์

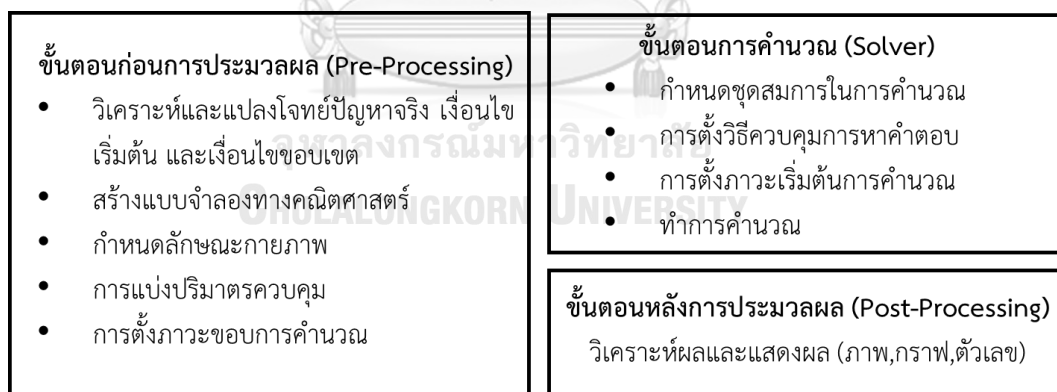


รูปที่ 10 ระบบ DAQ ของการทำงานของเครื่องวิเคราะห์เสียงผ่านโปรแกรม LabVIEW [32]

2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและโครงสร้างข้อมูลในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การไหลต่าง ๆ อาทิ การแพร่กระจายของอนุภาค การถ่ายเทโมเมนตัม มวล ความร้อนและการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยมีพื้นฐานการพิจารณาของไหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในรูปลักษณะของปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ และแก้สมการอนุพันธ์ ซึ่งจะให้ผลเฉลยที่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการที่ทำการจำลองได้ การจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางพลศาสตร์ของไหลจะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุพันธ์ 4 สมการหลัก ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass equation) หรือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (Conservation of Species equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy equation) ซึ่งวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลนั้นสามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ พัฒนา ปรับปรุงและสามารถเห็นพฤติกรรมของของไหลได้ชัดเจนมากขึ้น [33]

ขั้นตอนในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) ขั้นตอนการคำนวณเพื่อแก้สมการ (Solver) และขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing) แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [34]

2.7.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)

ในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะต้องวิเคราะห์ปัญหาหรือโจทย์ที่ต้องการจะศึกษาก่อน โดยจะสร้างรูปทรงของกระบวนการที่ต้องการจำลองหรือพื้นที่การไหลของไหล เรียกว่า รูปทรงโดเมนการคำนวณ นำไปแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ กำหนดลักษณะ

กายภาพของของไหลที่ต้องการ เช่น ชนิดของไหล ขนาดอนุภาค และคุณสมบัติของของไหล เป็นต้น ตั้งค่าเงื่อนไขของภาวะของการคำนวณ (Boundary conditions) ให้ใกล้เคียงกับระบบการทดลองจริง [34] จากนั้น ทำการทดสอบหาจำนวนปริมาตรควบคุมที่เหมาะสมในทางคำนวณ (Grid independent test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่า จำนวนปริมาตรควบคุมที่ใช้ มีความเหมาะสมหรือไม่ โดยพิจารณาจากผลเฉลยของการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

2.7.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)

วิธีการแก้สมการอนุพันธ์ด้วยการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์จะแบ่งเป็น 3 วิธีการหลัก [34] ดังนี้

1. วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) เป็นวิธีการคำนวณที่ประยุกต์อนุกรมเทย์เลอร์ในการประมาณค่าอนุพันธ์ย่อยของสมการให้เป็นพีชคณิต สมการพีชคณิตจะถูกนำไปประยุกต์เข้ากับโหนด (Node) แต่ละจุด ซึ่งเหมาะกับการแก้ปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมากและรูปแบบของเมชกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ
2. วิธีชิ้นประกอบจำกัด (Finite element) เป็นวิธีแบ่งโดเมนปัญหาออกเป็นชิ้นย่อย ๆ ในการคำนวณ ซึ่งเหมาะกับโดเมนปัญหาที่มีความซับซ้อนและง่ายต่อการเพิ่มความละเอียดของเมช
3. วิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) เป็นวิธีที่มีลักษณะคล้ายกับวิธีชิ้นประกอบจำกัด โดยการเปลี่ยนโดเมนให้เป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ซึ่งเหมาะกับการคำนวณของไหลที่มีความซับซ้อน

2.7.3 ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)

ขั้นตอนหลังการประมวลผล เป็นการนำตัวเลขผลเฉลยจากการแก้สมการข้างต้นมาประมวลผลต่อ และแสดงผลการคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ เช่น กราฟคอนทัวร์ (Contour plot) กราฟเส้น (Line plot) กราฟเวกเตอร์ (Vector plot) เป็นต้น [34] เพื่อช่วยให้เห็นภาพพฤติกรรมของไหลของของไหลในกระบวนการที่สร้างขึ้น มีความชัดเจนยิ่งขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Armstrong และคณะ [10] ได้เสนอโครงการ “สีอัจฉริยะ (Smart paint)” ที่สามารถเปลี่ยนอาคารให้กลายเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยการผสมโปรโตเซลล์ (Protocells) ลงในสีแล้วทาเคลือบลงบนผนังเพื่อเกิดการเกิดปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจนเปลี่ยนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และเกิดการตกตะกอนสะสม ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่าเป็น “ไบโโอลามม์ (Biolime)” ที่เคลือบอยู่บนผิวของคอนกรีต และหินปูนนี้สามารถให้ความแข็งแรงกับผนังคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม ในส่วนของประสิทธิภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะยังไม่สูงมาก เพราะต้องใช้พื้นที่ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ และถูกจำกัดด้วยปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบขนส่งในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ทาง Armstrong และคณะจึงได้ให้แนวคิดว่าในปัจจุบันอาคารจะกลายเป็นเครื่องมือที่สามารถเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้

Yafei Guo และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่ความเข้มข้นต่ำ โดยในงานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่อับอากาศ และได้กำหนดเงื่อนไขที่จะใช้ในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิในการดูดซับอยู่ระหว่าง 20 – 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ สัดส่วนน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 1 – 2.5 เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหลของแก๊สอยู่ระหว่าง 300 – 700 มิลลิลิตร/นาที และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า 1% พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นกับปัจจัยของอุณหภูมิเป็นหลัก รองลงมาคือปัจจัยของปริมาณน้ำในแก๊ส และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับ ประการแรกปัจจัยของอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่างกัน ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถดักจับได้สูงสุด และประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณสารตั้งต้นที่ลดลงทำให้ไม่มีแรงขับที่มากพอในการทำให้ปฏิกิริยาเดินไปข้างหน้า อีกทั้งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้อาจเป็นผลของปริมาณน้ำที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จึงได้ทำการศึกษาสัดส่วนโมลของน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ 1% 1.5% 2% และ 2.5% ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสพบว่า ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปอยู่ในไอน้ำได้มากขึ้น จึงมีสารตั้งต้นที่เพิ่มมากขึ้น และมีโอกาสในการสัมผัสกับตัวดูดซับมากขึ้น ประการสุดท้ายปัจจัยของอัตราการไหลของแก๊ส ในการทดลองนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของแก๊สที่ 300 400

500 600 และ 700 มิลลิลิตร/นาที่ ที่ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และจะเริ่มลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงถึงจุดหนึ่ง ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเป็นการเพิ่มโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้น และหากเป็นการเพิ่มความเร็วด้วย เมื่อความเร็วมากเกินไป ระยะเวลาในการสัมผัสกันของเฟสแก๊สกับของแข็งจะลดลงไปด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม หากความเร็วต่ำเกินไปก็ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับอย่างมีนัยยะสำคัญเช่นกัน

Rafael และคณะ [36] ศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศโดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ชนิดรังผึ้ง (Activated carbon honeycomb) ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการศึกษาผลกระทบอุณหภูมิในการดูดซับ ความดันไอน้ำในอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ ต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ในเบื้องต้นพบว่า ความดันไอน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด นอกจากนี้ลักษณะของตัวดูดซับที่แตกต่างกันนำไปสู่โครงสร้างภายในรูพรุนที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่สามารถหาประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดจริง ซึ่งควรจะเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตต่อปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้น เพื่อให้ประสิทธิภาพในการดักจับที่สูงขึ้น

Rafael และคณะ [37] ได้ศึกษาต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ชนิดรังผึ้ง (Activated carbon honeycomb) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอกลไกการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นไปได้ อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำในอากาศ และปริมาณของเกลือโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณน้ำในอากาศเป็นหลัก ในส่วนของปัจจัยจากอุณหภูมิ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางเคมีที่สอดคล้องกับกระบวนการคายพลังงาน โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากปฏิกิริยาจะไปยับยั้งการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 0.166 มิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 5 มิลลิบาร์ ที่อัตราการไหล 5 และ 15 ลิตรต่อนาที นอกจากนี้ ผลจากปัจจัยของปริมาณน้ำในอากาศจะชัดเจนเมื่อทดลองที่อุณหภูมิต่ำ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิต่ำ ประสิทธิภาพใน

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำปิดรูพรุนของตัวดูดซับ

Dheilly และคณะ [38] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ ความชื้นของอากาศ (30 60 และ 100%RH) และอุณหภูมิ (10 20 และ 40 องศาเซลเซียส) พบว่า ผลกระทบของความชื้นส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตมากกว่าผลกระทบจากอุณหภูมิ กล่าวคือ ที่ความชื้นต่ำ (30%RH) มีเพียงที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตได้ 6.5% ขณะที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส ไม่แสดงผลของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนต จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนต ขณะที่เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 60 และ 100%RH พบว่า การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส คือ 31.1 และ 71.3% ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ความชื้น 100%RH พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตมีค่าลดลง

Shih และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 – 90 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาดักจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ก็ต่อเมื่อระบบมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 8 อีกทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและสัดส่วนการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นในระบบด้วย ทั้งนี้ Shih และคณะได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับปัจจัยของความชื้นในระบบส่งผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ซับซ้อน กล่าวคือ เมื่อปริมาณไอน้ำในระบบเพิ่มขึ้น ไอน้ำนี้จะไปเกาะบนผิวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ca^{2+} และ OH^-) อีกทั้งไอน้ำที่รวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับไอออน (OH^-) ได้เป็น CO_3^{2-} ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เป็นแคลเซียมคาร์บอนเนต ($\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$) ซึ่งกระบวนการดักจับนี้จะเกิดได้ดี เมื่อปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลถึงชั้นฟิล์มน้ำที่เคลือบอยู่บนตัวของแข็ง แต่กระบวนการดักจับจะเริ่มลดลงเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอนเนตไปปิดรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง และส่งผลถึงปริมาณของความชื้นในระบบที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะกลายเป็นชั้นฟิล์มหนาที่เคลือบพื้นผิวของตัวดูดซับทำให้ปฏิกิริยาการดักจับลดลงจนเหลือเพียงการแพร่ทางกายภาพเท่านั้น

Ridha และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำประมาณ 0.5 และ 2.0% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 22 องศาเซลเซียส) ผ่านเครื่อง

ปฏิกิริยาเบตนิ่ง สารดูดซับที่ใช้จะเป็นลามี (lime) และลามีชนิดเม็ด (pelletized) ก่อนเริ่มการทดลองได้มีการทำให้สารดูดซับมีความชื้นก่อน (pre-hydrated) โดยป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านน้ำที่อัตราการไหล 650 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผ่านสารดูดซับ จากนั้น ป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านน้ำที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2% โดยปริมาตร เพื่อทำการทดลอง พบว่าขั้นตอนการทำให้สารดูดซับมีความชื้นก่อน (pre-hydrated) ส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดนี้เพิ่มสูงขึ้น สำหรับการทดสอบที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5% โดยปริมาตร จะเพิ่มเวลาเบรคทรู (CO₂ breakthrough time) จาก 19 นาที เป็น 750 นาที และสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 510 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสารดูดซับลามีชนิดเม็ด ซึ่งนักวิจัยได้ตั้งข้อสังเกตว่าความชื้นน่าจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่บรรยากาศโดยการใช้ลามี



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาอาคาร โดยการปรับปรุงองค์ประกอบของสีและตรวจวัดความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะต่าง ๆ รวมถึงพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังที่เคลือบด้วยสีที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว ดังนั้น เพื่อให้การศึกษานี้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำ และใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงได้แบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- การจัดเตรียมอุปกรณ์และสร้างเครื่องมือในการทดลอง
- การเตรียมสี และการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี
- การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของผนังที่มีการเคลือบด้วยสี

ส่วนแรกจะเป็นการจัดเตรียมอุปกรณ์และสร้างเครื่องมือในการทดลอง จากแนวคิดที่กล่าวว่า “เปลี่ยนผนังให้กลายเป็นเสมือนต้นไม้ที่สามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้” วิธีการประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ดำเนินการโดยการพัฒนาสีทาอาคารที่สามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นกว่าที่เป็นอยู่เดิม ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการทาสีที่พัฒนาคุณสมบัติแล้วบนแผ่นกระดาษหอรูปลี่เหลี่ยม และผ่านอากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์มาบนผิวกระดาษเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการสัมผัสกับผิวหน้าของกระดาษและเกิดปฏิกิริยาการดูดซับขึ้น ดังนั้น เพื่อทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคารให้มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงได้มีการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการตรวจวัด และควบคุมระบบให้มีภาวะเหมือนจริงให้มากที่สุด

ส่วนต่อมาจะเป็นการเตรียมสีและการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ในการเตรียมสีที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น จะต้องมีการผสมสารดูดซับบางชนิด เพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ การวิจัยพัฒนาสีในครั้งนี้เป็นความร่วมมือร่วมกับบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) โดย บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) ได้ให้ข้อมูลเบื้องต้นและผสมสีตามสัดส่วนที่สามารถใช้งานได้ ผู้วิจัยออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมตัวดูดซับลงในสี บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) นำสัดส่วนการผสมตัวดูดซับไปทำการเตรียมสี โดยมีเงื่อนไขคือ สีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นอกจากจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แล้ว คุณสมบัติจะต้องผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสีที่ใช้ในการก่อสร้างและตกแต่งด้วย

ในส่วนของการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกจะทำการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนในการเติมสารดูดซับที่เหมาะสมลงในสีทาอาคาร เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และสีสามารถใช้งานได้จริง จากนั้นส่วนที่สองจะนำสีที่ได้ข้างต้น มาศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของของไหล ความชื้น และอุณหภูมิ เป็นต้น และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาอาคาร

ส่วนสุดท้ายจะเป็นการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของผนังที่มีการเคลือบด้วยสีทาผนังอาคารแบบปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent R20 แบบจำลองเป็นแบบสามมิติ การคำนวณจะใช้สมการการถ่ายโอนโมเมนตัม พลังงาน อนุรักษ์มวลและสมการจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองร่วมด้วย รวมถึงภาวะที่ใช้ในการทดสอบจะคล้ายการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการดูดซับในสีทาอาคาร ดังนั้นในส่วนนี้จะนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมี

1. สารเคมีที่เป็นส่วนประกอบภายในสีบางส่วนที่สนใจในงานวิจัยนี้ ได้แก่
 - แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) น้ำหนักโมเลกุล 100.09 กรัมต่อโมล (Commercial grade)
 - ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) น้ำหนักโมเลกุล 79.87 กรัมต่อโมล (Commercial grade)
 - อะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate, Al_2SiO_3) น้ำหนักโมเลกุล 130.05 กรัมต่อโมล (Commercial grade)
 - แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)_2) น้ำหนักโมเลกุล 74.09 กรัมต่อโมล (Commercial grade)
 - โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล 138.21 กรัมต่อโมล (Commercial grade)
2. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2.2 แก๊ส

1. แก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ในสมดุลงด้วยแก๊สไนโตรเจน (บริษัท ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด)
2. แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร (บริษัท ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด)

3.2.3 อุปกรณ์ในการเตรียมสี

1. บีเกอร์ 250 มิลลิลิตร (Beaker)
2. แปรงทาสี (Paint brush)
3. กระดาษชานอ้อย (Bagasse paper) กว้าง 14.9 เซนติเมตร ยาว 21.0 เซนติเมตร หนา 0.16 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่งละเอียด (Weighing-machine)

3.2.4 ตัวควบคุมการไหลของแก๊ส

- ตัวควบคุมอัตราการไหล ยี่ห้อ Nitto รุ่น K-1012 ช่วงการไหล 0.5 – 5 ลิตรต่อนาที
- ตัววัดอัตราการไหล ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น FD-A10
 - ช่วงการวัดอัตราการไหล : 30 – 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ความแม่นยำ : $\pm 0.5\%$ F.S. หรือน้อยกว่า
 - ภาวะดำเนินการ : 0 – 60 องศาเซลเซียส, 10 – 85% RH, ไม่มีการควบแน่น

3.2.5 เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

- รุ่น K-30 10% CO₂ Smart Sensor
 - ช่วงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ : 0 – 10% โดยปริมาตร
 - ความแม่นยำ : ± 300 ส่วนในล้านส่วน ที่ อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP)
 - ภาวะดำเนินการ : 0 - 50°C, 0 - 95% RH, ไม่มีการควบแน่น

3.2.6 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ KW รุ่น PT100
 - ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ : 0 – 250 องศาเซลเซียส
 - ความแม่นยำ : $\pm 0.3\%$ F.S. หรือต่ำกว่า

3.2.7 เซนเซอร์วัดความดัน

- เซนเซอร์วัดความดัน ยี่ห้อ SMC รุ่น ISE30A-01-F-ML
 - ช่วงความดัน: -0.1 – 1.0 เมกะปาสคาล
 - ความแม่นยำ: $\pm 2\%$ F.S. หรือต่ำกว่า
 - ภาวะดำเนินการ: 0 – 60 องศาเซลเซียส, 20 – 90% RH, ไม่มีการควบแน่น

3.2.8 เซนเซอร์วัดมลภาวะทางอากาศ (ความชื้น, PM 2.5, ฟอर्मัลดีไฮด์)

- เซนเซอร์วัดมลภาวะทางอากาศ ยี่ห้อ DFRobot รุ่น SEN0233 (เลือกเฉพาะวัดความชื้น)
 - ช่วงการวัดความชื้น: 0 – 99% RH
 - ความแม่นยำ: $\pm 2\%$
 - ภาวะดำเนินการ: -10 – 60 องศาเซลเซียส, 0 – 99% RH

3.2.9 โครงตั้งเครื่อง

- อะลูมิเนียมโปรไฟล์ (Aluminum profile) ขนาด 40 x 40 มิลลิเมตร และอุปกรณ์ข้อต่อ
- แผ่นอะคริลิก หน้า 1.5 เซนติเมตร

3.2.10 วัสดุของตัวเครื่อง

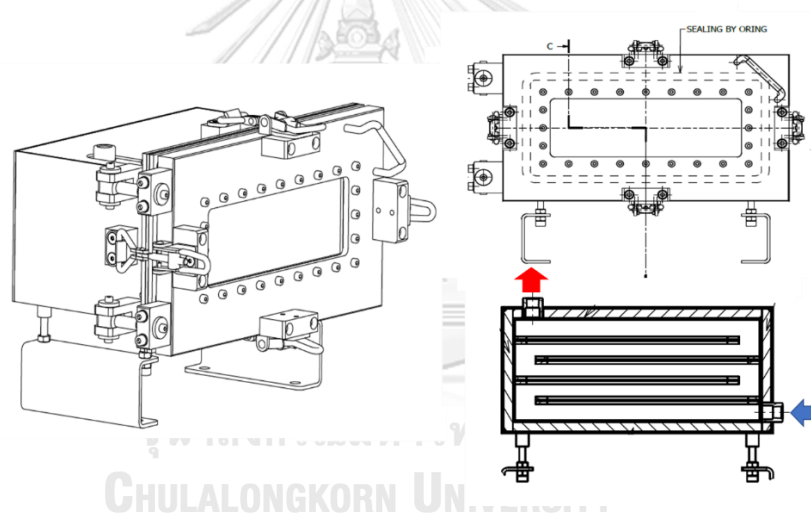
- สแตนเลสเกรด 304 (SUS 304)
- ฉนวนความร้อน

3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

3.3.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลอง

- อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบ

อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดภายใน กว้าง 149 มิลลิเมตร ยาว 230 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร มีฉนวนความร้อนล้อมรอบ ภายในแบ่งเป็น 4 ชั้นสลับซ้ายขวา สำหรับใส่กระดาษขนาดกว้าง 149 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร แต่ละชั้นห่างกัน 20 มิลลิเมตรจากกึ่งกลางชั้น มีประตูสำหรับเปิด - ปิด เพื่อใส่กระดาษบริเวณด้านหน้า นอกจากนี้มีทางเข้าแก๊สด้านล่างทางขวา และทางออกแก๊สด้านบนทางซ้าย ซึ่งท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เท่ากับ 16 มิลลิเมตร มีวาล์วเปิด - ปิดทั้งทางเข้าและทางออก ตามรูปที่ 12 และ 13



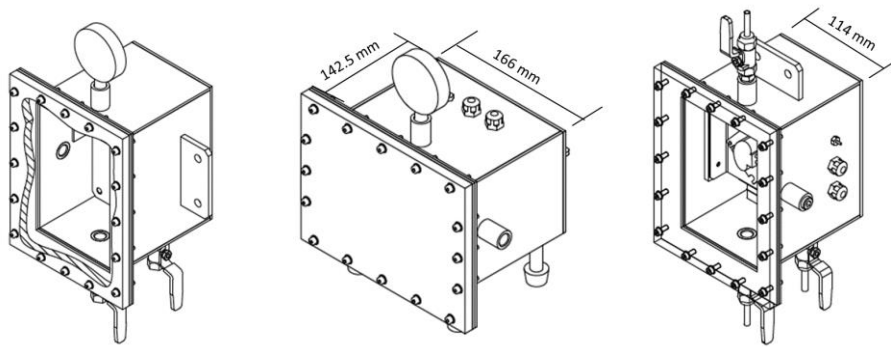
รูปที่ 12 แบบร่างอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบ



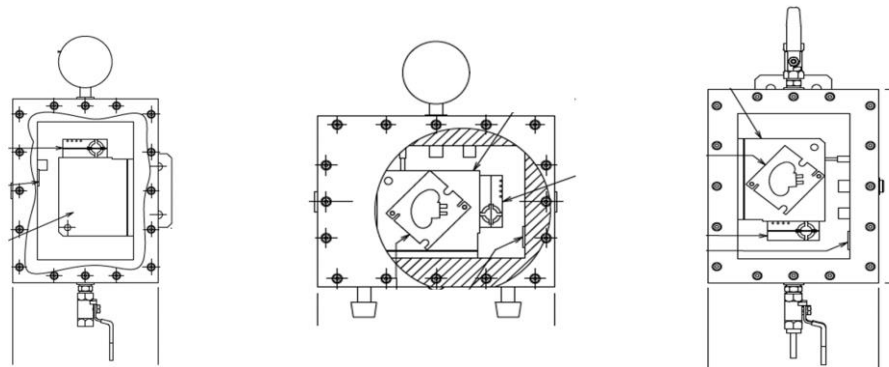
รูปที่ 13 อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบเมื่อสร้างเสร็จแล้ว

- กล่องใส่อุปกรณ์ตรวจวัด

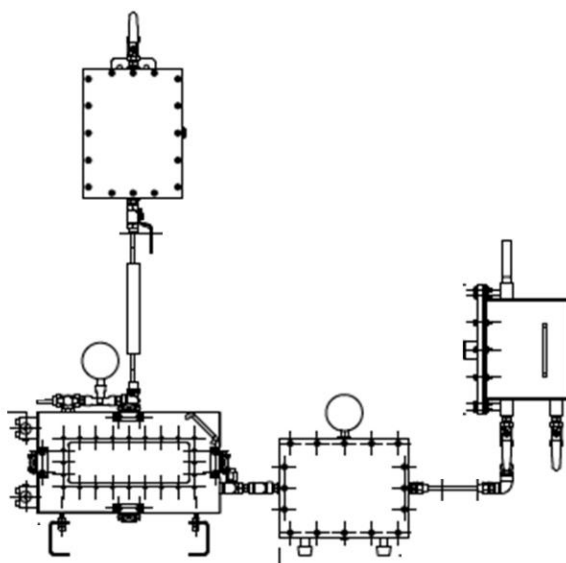
กล่องสำหรับใส่อุปกรณ์ตรวจวัดเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด กว้าง 108 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร ลึก 106 มิลลิเมตร ภายนอกมีฉนวนความร้อนหุ้ม ภายในติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ได้แก่ เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ เซนเซอร์วัดความชื้น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ตามรูปที่ 14 และ 15 จากนั้นตั้งตามตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 14 แบบร่างโครงสร้างลักษณะกล่องใส่อุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ 15 แบบร่างลักษณะภายในกล่องใส่อุปกรณ์ตรวจวัดและตำแหน่งการวางเซนเซอร์



รูปที่ 16 แบบร่างตำแหน่งการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด

- อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)

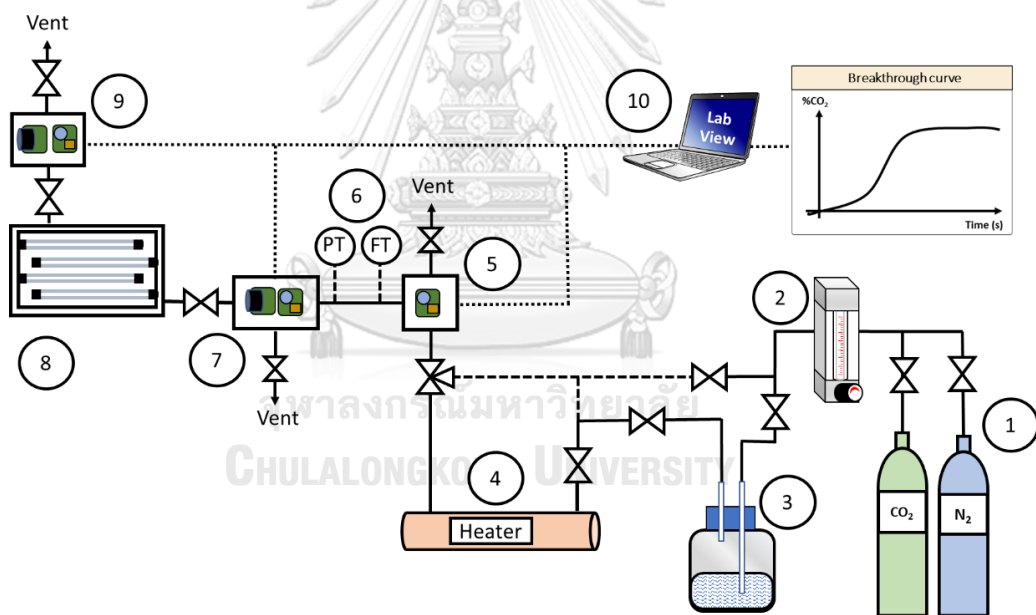
อุปกรณ์ให้ความร้อนมีลักษณะภายนอกเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33.8 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ภายในเป็นแผ่นให้ความร้อนแบบเกลียว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนของแก๊สต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายไฟ ซึ่งทำให้สามารถกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการได้ ภายนอกหุ้มฉนวนความร้อนกันการสูญเสียความร้อนที่ตัวเครื่อง

- ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสีทาอาคาร

ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคาร แสดงดังรูปที่ 17 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. ถังแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 6% ในสมดุลไนโตรเจน และ ถังไนโตรเจน ความบริสุทธิ์สูง 99.99%
2. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตร
3. ขวดบรรจุน้ำสำหรับผลิตไอน้ำที่ใช้ในระบบ
4. อุปกรณ์ให้ความร้อนแก๊ส

5. กล้องเซนเซอร์ 1 สำหรับวัดความชื้นและอุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากอุปกรณ์ให้ความร้อน
6. เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของแก๊สและความดันในระบบ
7. กล้องเซนเซอร์ 2 สำหรับวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และอุณหภูมิขาเข้า
8. อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทดสอบ
9. กล้องเซนเซอร์ 3 สำหรับวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และอุณหภูมิขาออก
10. คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน และอัตราการไหล ผ่านโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 17 ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสีทาอาคาร

3.3.2 การเขียนโปรแกรมสำหรับอ่านค่าจากเซนเซอร์ (LabVIEW)

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์วัดค่าที่ส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์มาเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป การแปลงสัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์วัดค่าควรจะต้องรู้ว่าสัญญาณไฟฟ้าที่จะเข้าคอมพิวเตอร์เป็นแบบใด และคอมพิวเตอร์ที่ใช้สามารถรับสัญญาณอะไรได้บ้าง เช่น สัญญาณอนาล็อก ($\pm 10V$ หรือ $4 - 20mA$), สัญญาณดิจิทัล หรือ Serial เป็นต้น ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณที่เรียกว่า Signal conditioning ซึ่งจะปรับสัญญาณให้เหมาะสมก่อนส่งเข้าที่ DAQ (Data acquisition) เพื่อแปลงค่าสัญญาณเป็นข้อมูลและเก็บข้อมูลเตรียมส่งเข้าคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรม LabVIEW จะทำการแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และแสดงผล

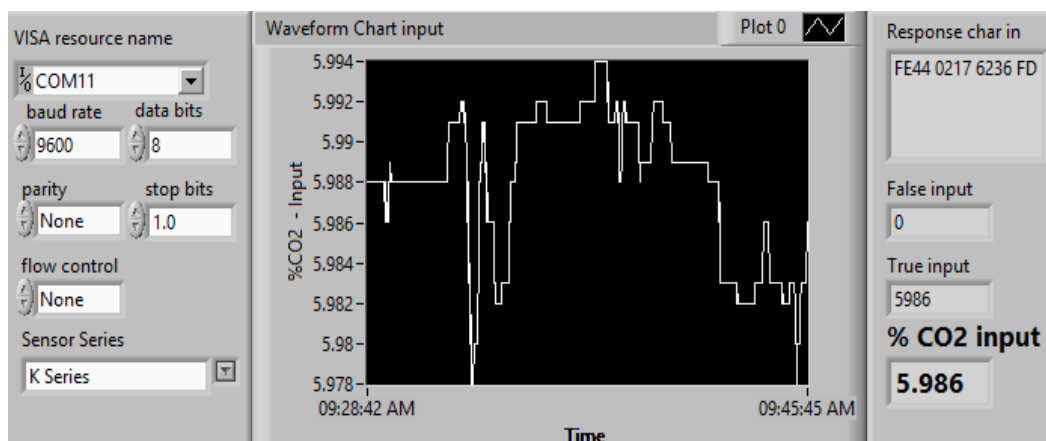
โปรแกรม LabVIEW เป็นการโปรแกรมโดยใช้สัญลักษณ์ (Graphical programming) ส่วนของ Block diagram ที่ใช้ในการเขียนโค้ดรูปภาพ จะแบ่งส่วนของข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล

3.3.2.1 การเขียนโปรแกรมสำหรับการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองนี้จะวัดค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 2 จุด บริเวณทางเข้าและทางออกแก๊ส โดยใช้เซนเซอร์ K-30 10% CO₂ Smart Sensor วัดความเข้มข้นและส่งสัญญาณออกผ่านตัวแปลงเป็นข้อมูล Serial ส่งเข้า Front Panel เพื่อแสดงผล แสดงดังรูปที่ 18

พารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับเข้าคอมพิวเตอร์

- รับข้อมูลผ่าน: Serial port
- Baud rate: 9600
- Data bits: 8
- Byte count: 7
- Sensor series: K Series
- จำนวนข้อมูลในการเก็บ: ทุก 10 วินาที



รูปที่ 18 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) ของการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า

3.3.2.2 การเขียนโปรแกรมสำหรับการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหล

การทดลองนี้วัดค่าอุณหภูมิ 2 จุด คือบริเวณทางเข้าและออกของแก๊สอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับ วัดความดันและอัตราการไหลบริเวณก่อนทางเข้าอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับ อุปกรณ์เหล่านี้ถูกต่อเข้ากับ Data Logger รุ่น AI-1608AY-USB และส่งข้อมูลสัญญาณอนาล็อก ($\pm 10V$) เข้าคอมพิวเตอร์ ซึ่ง Data Logger ตัวนี้จะมี library สำหรับอ่านข้อมูลมาโดยเฉพาะใน LabVIEW ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ต่อได้ แสดงดังรูปที่ 19 และ 20

พารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับเข้าคอมพิวเตอร์

- ชื่ออุปกรณ์ DAQ: AIO000
- สัญญาณไฟฟ้าประเภท: $\pm 10V$

พารามิเตอร์ของการวัดอุณหภูมิ

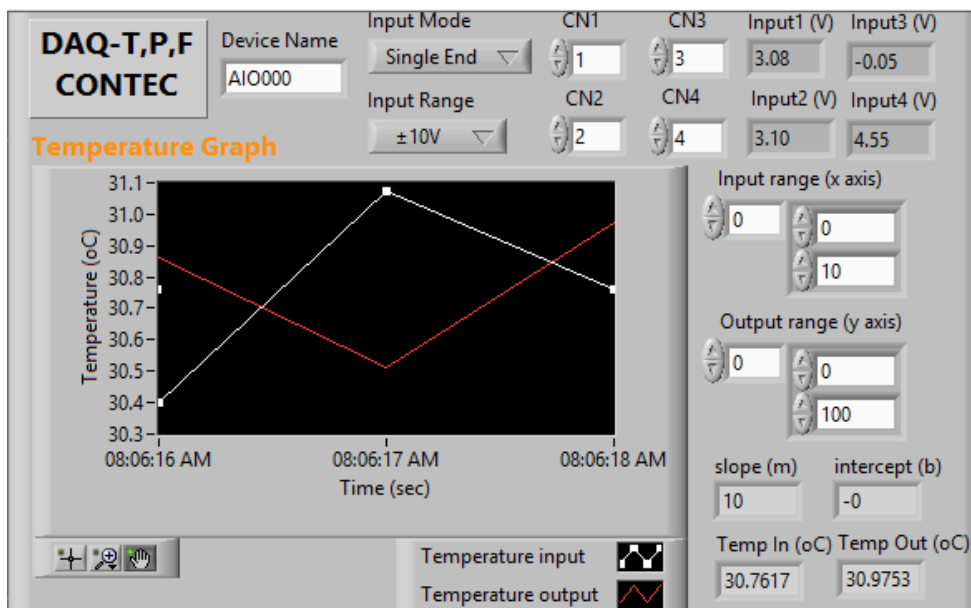
- ช่องการเชื่อมต่อ: ช่อง 1 (วัดอุณหภูมิขาเข้า) และ ช่อง 2 (วัดอุณหภูมิขาออก)
- ช่วงของการอ่านค่าอุณหภูมิ: 0 – 100 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์ของการวัดความดัน

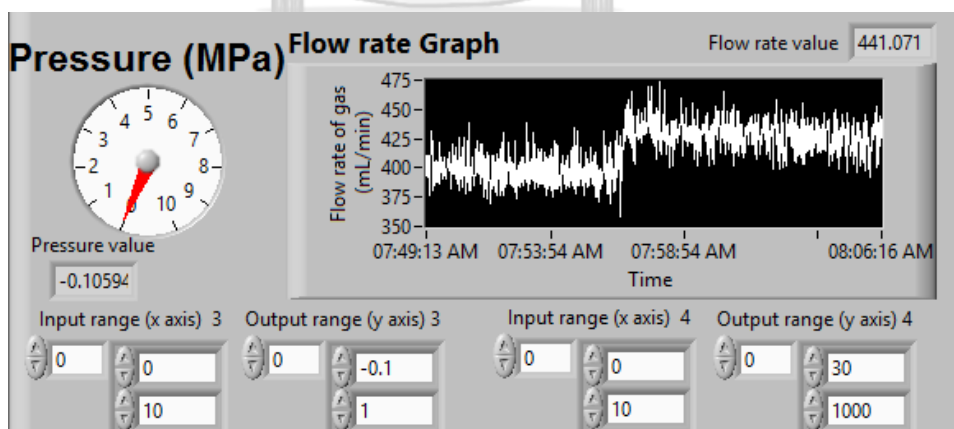
- ช่องการเชื่อมต่อ: ช่อง 3
- ช่วงของการอ่านค่าความดัน: -0.1 – 1 เมกะปาสคาล

พารามิเตอร์ของการวัดอัตราการไหล

- ช่องการเชื่อมต่อ: ช่อง 4
- ช่วงของการอ่านค่าอัตราการไหล: 30 – 1000 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 19 หน้าจอแสดงผล (Front panel) ของการวัดอุณหภูมิขาเข้า-ขาออก



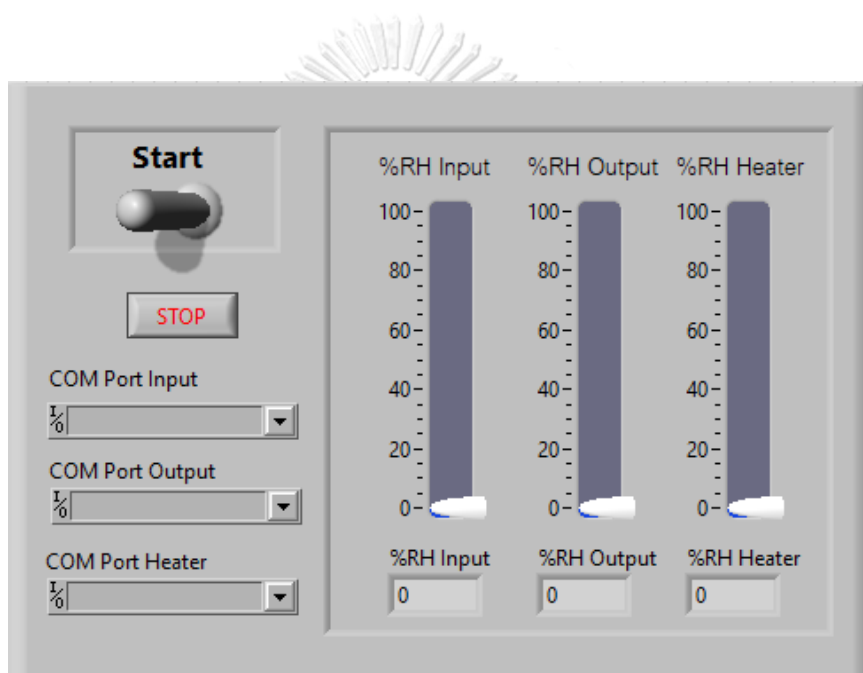
รูปที่ 20 หน้าจอแสดงผล (Front panel) ความดันและอัตราการไหล

3.3.2.3 การเขียนโปรแกรมสำหรับการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความชื้น

เซนเซอร์วัดมลภาวะทางอากาศ รุ่น SEN0233 สามารถวัดค่าได้หลายตัว เช่น ค่าPM10 ค่าPM2.5 ค่า PM1.0 ค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ค่าอนุภาค และค่าความชื้น โดยในการทดลองนี้จะเลือกแสดงค่าเฉพาะความชื้นเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 21

พารามิเตอร์ของการวัดความชื้น

- รับข้อมูลผ่านทาง: Serial port
- ช่วงการอ่านค่าความชื้น: 0 – 99%RH



รูปที่ 21 หน้าจอแสดงผล (Front Panel) ของความชื้น

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบ

3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. เตรียมกระดาษชานอ้อยขนาด กว้าง 149 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น
2. ชั่งสีที่ต้องการทดสอบ 100 กรัม
3. ทาสีลงบนกระดาษชานอ้อยทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยจะเว้นระยะจากขอบกระดาษ 10 มิลลิเมตร ทั้งหมด 3 ด้าน จดบันทึกน้ำหนักของสีที่ใช้ไปในแต่ละด้าน

4. ตากให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดลอง



รูปที่ 22 ลักษณะการทำสับนกระดาศานอ้อย

3.3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

- การทำความสะอาดระบบ

ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องเตรียมอุปกรณ์ทดสอบให้อยู่ในภาวะพร้อมใช้งาน โดยการกำจัดแก๊สและสิ่งเจือปนที่ค้างในระบบก่อน ทำโดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลที่ 800 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกล่องเซนเซอร์ 2 (ขาเข้า) มีค่าเท่ากับ 0% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกล่องเซนเซอร์ 3 (ขาออก) มีค่าต่ำกว่า 0.05% โดยปริมาตร จากนั้นจะทำการใส่กระดาศที่เคลือบด้วยสีเรียบร้อยแล้วในอุปกรณ์ทดสอบ และทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนอีกครั้งเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในระบบที่เข้ามาตอนใส่กระดาศ จนกระทั่งวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งกล่องเซนเซอร์ 2 (ขาเข้า) และกล่องเซนเซอร์ 3 (ขาออก) ได้เท่ากับ 0% และ ต่ำกว่า 0.05% โดยปริมาตร ตามลำดับ และปิดวาล์วทั้งขาเข้าและออกจากระบบ เพื่อป้องกันให้มีสิ่งเจือปนในระบบน้อยที่สุด

- การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ให้พร้อมก่อนป้อนเข้าอุปกรณ์ทดสอบ

การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร หลังจากทำความสะอาดระบบเรียบร้อยแล้วจะทำการชั่งแก๊สภายในอุปกรณ์ทดสอบ และจะปรับ

ภาวะของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าผ่านกลองเซนเซอร์ 2 โดยการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านน้ำ/ไม่ผ่านน้ำ และปรับอุณหภูมิของแก๊สผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน กลองเซนเซอร์ 2 ซึ่งมีอุปกรณ์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้น จะทำการตรวจวัดค่า เมื่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ร้อยละ 6 โดยปริมาตร ความชื้น อุณหภูมิ และอัตราการไหลได้ตามภาวะที่ต้องการ แล้วก็เปิดวาล์วขาเข้า เพื่อปล่อยแก๊ส เข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบ

- ภาวะที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ร้อยละ 6 โดยปริมาตร เนื่องจากการเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงบรรยากาศจริง คือ ประมาณ 350 – 400 ส่วนในล้านส่วน [41] ค่อนข้างยากและต้องใช้ทรัพยากรสูง อีกทั้งการใช้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำต้องใช้เวลานานเพื่อเห็นการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การเลือกใช้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าบรรยากาศ แต่ต่ำกว่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ อัตราการไหลของแก๊สจะใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเร็วของลมสงบ คือ 0.3 เมตรต่อวินาที [42] เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับของแข็งให้มากขึ้น [37] อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยจะอ้างอิงตามค่าเฉลี่ยของประเทศไทย [43] และความชื้นของแก๊สจะแบ่งเป็น แก๊สที่ผ่านน้ำและแก๊สที่ไม่ผ่านน้ำ แสดงดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ภาวะที่ใช้ในการศึกษาสัดส่วนตัวดูดซับของแข็งในสัทอาอาคารต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสัทอาอาคาร

| ภาวะการทดลอง | การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ |
|---|---------------------------|
| อุณหภูมิ (เซลวิน) | 303 |
| ความดัน (บาร์) | 1 |
| อัตราการไหลของแก๊ส (มิลลิเมตรต่อวินาที) | 100 |
| ปริมาณสี (กรัม) | 100 |
| ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าระบบ (%Vol) | 6 |
| ลักษณะแก๊ส | ผ่านน้ำ |

ตารางที่ 5 ภาวะที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคาร
ที่ตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป

| ภาวะการทดลอง | การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ |
|---------------------------------------|---------------------------|
| อุณหภูมิ (เคลวิน) | 303 313 และ 323 |
| ความดัน (บาร์) | 1 |
| อัตราการไหลของแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที) | 200 400 และ 600 |
| ปริมาณสี (กรัม) | 100 |
| ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบ (%Vol) | 6 |
| ลักษณะแก๊ส | ไม่ผ่านน้ำ และ ผ่านน้ำ |

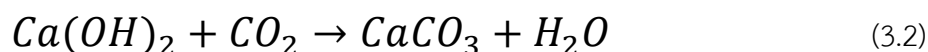
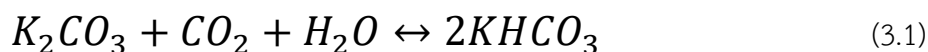
3.3.4 การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี

กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สีทาอาคารจะเกิดขึ้น เมื่อแก๊สที่ไหลผ่านวาล์วทางขาเข้าของอุปกรณ์ทดสอบ สัมผัสกับตัวดูดซับของแข็งที่เกาะอยู่บนสีที่เคลือบอยู่บนกระดาษกรองเซนเซอร์ 2 จะทำการวัดค่าภาวะต่าง ๆ ที่บริเวณทางเข้าอุปกรณ์ทดสอบ และกล่องเซนเซอร์ 3 ที่บริเวณทางออกของอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งแก๊สในระบบเข้าภาวะสมดุล กล่าวคือค่าความเข้มข้นทางออกจะเท่ากับทางเข้า โดยในการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 160 นาที ในการทดสอบ ข้อมูลทั้งหมดที่อ่านได้จากกล่องเซนเซอร์จะทำการบันทึกทุก ๆ 10 วินาที จากนั้นจะนำมาวิเคราะห์และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคาร

3.3.4.1 องค์ประกอบของสีทาอาคารที่นำมาทดสอบ

สีทาอาคารประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ สารยึดเกาะ ผงสี สารเติมแต่ง และตัวทำละลาย การปรับสัดส่วนของสีให้มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งานมีได้หลายรูปแบบ เช่น สีที่ช่วยป้องกันเชื้อรา จะเป็นการปรับสัดส่วนหรือชนิดในส่วนของสารเติมแต่ง เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับงานวิจัยของแต่ละบริษัทที่ว่าจะเลือกปรับที่องค์ประกอบใด สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากสนใจตัวดูดซับของแข็ง จึงเลือกที่จะปรับสัดส่วนในส่วนขององค์ประกอบในผงสี โดยจะแบ่งตัวดูดซับออกเป็น 2 ชนิด ดังตารางที่ 6 ซึ่งสัดส่วนของแข็งที่แสดงในตาราง 6 เป็นเพียงองค์ประกอบหลักบางส่วนที่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกของสี ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จะช่วยในเรื่องของความขาว แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ อะลูมิเนียมซิลิเกต (Al_2SiO_3) จะช่วย

ในเรื่องของการเพิ่มเนื้อสี ส่วนตัวดูดซับของแข็งที่เติมเพิ่มเข้าไปจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือส่วนของโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพราะมีคุณสมบัติในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2



นอกจากนี้หัวข้อ 2.5.1 จะเห็นว่ามีการจำแนกสีได้หลายประเภทตามการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะจำแนกประเภทของสีตามลักษณะออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สีลักษณะด้าน สีลักษณะกึ่งเงา และสีลักษณะเงา ตามตารางที่ 6 สำหรับชนิดสี Paint1 – 3 จะสามารถเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตได้ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และปรับสัดส่วนอื่น เพื่อให้สามารถรักษาสมบัติของสีทาอาคารได้ ส่วนชนิดสี Paint4 สัดส่วนหลักจะเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยจะเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 9 – 12 โดยน้ำหนัก และปรับสัดส่วนอื่น ซึ่งลักษณะสีที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันตามสัดส่วนที่ใช้ ทั้งนี้ขึ้นกับความเห็นตามความเหมาะสมของบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) ที่ร่วมวิจัยด้วย และชนิดสี Paint5 จะเป็นสีน้ำชนิดเกรดบน

ตารางที่ 6 ข้อมูลองค์ประกอบที่ศึกษาภายในสี

| ชนิดสี | ส่วนประกอบในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | ตัวดูดซับของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | ประเภทของสี |
|--------|--------------------------------------|-------------|---------|--|------------|-------------|
| | $CaCO_3$ | Al_2SiO_3 | TiO_2 | K_2CO_3 | $Ca(OH)_2$ | |
| Paint1 | 15 - 20 | 10 - 15 | 10 - 15 | 0, 0.2, 0.5 และ 1 | - | ขาวด้าน |
| Paint2 | 10 - 15 | 5 - 10 | 15 - 20 | 0, 0.2, 0.5 และ 1 | - | ขาวกึ่งเงา |
| Paint3 | - | 10 - 15 | 15 - 20 | 0, 0.2, 0.5 และ 1 | - | ขาวเงา |
| Paint4 | 40 - 45 | - | - | - | 9 - 12 | เทาด้าน |
| Paint5 | 15 - 20 | >10 | >10 | - | - | ขาวด้าน |

3.3.4.2 การทดลองทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี

การทดลองในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมตัวดูดซับลงในสีทาอาคาร เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 7 ทั้งนี้คุณสมบัติที่ได้จะต้องสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้และสีสามารถเก็บรักษาเป็นระยะเวลามากกว่า 5 ปีได้โดยไม่เสียรูป [44] ส่วนที่สองจะนำสีที่ได้จากส่วนแรกมาศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อภาวะต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมตัวดูดซับลงในสีทาอาคาร

| ลำดับ | ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | อัตราการไหล ของแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที) | อุณหภูมิ (เคลวิน) | ความชื้น (ผ่านน้ำ/ไม่ผ่านน้ำ) |
|-------|--------|--|--|----------------------|----------------------------------|
| 1 | กระดาษ | - | 100 | 303 | ผ่านน้ำ |
| 2 | Paint1 | 0 | | | |
| 3 | Paint1 | 0.2 | | | |
| 4 | Paint1 | 0.5 | | | |
| 5 | Paint1 | 1.0 | | | |
| 6 | Paint2 | 0 | | | |
| 7 | Paint2 | 0.2 | | | |
| 8 | Paint2 | 0.5 | | | |
| 9 | Paint2 | 1.0 | | | |
| 10 | Paint3 | 0 | | | |
| 11 | Paint3 | 0.2 | | | |
| 12 | Paint3 | 0.5 | | | |
| 13 | Paint3 | 1.0 | | | |
| 14 | Paint4 | 9 – 12 | | | |
| 15 | Paint5 | - | | | |

ตารางที่ 8 ชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อภาวะต่าง ๆ เปลี่ยนแปลง

| ลำดับ | ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | อัตราการไหล ของแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที) | อุณหภูมิ (เคลวิน) | ความชื้น (ผ่านน้ำ/ไม่ผ่านน้ำ) |
|-------|--------|--|--|----------------------|----------------------------------|
| 1 | กระดาษ | - | 200 | 303 | ผ่านน้ำ |
| 2 | Paint4 | 9 – 12 | | | |
| 3 | Paint5 | - | | | |
| 4 | กระดาษ | - | 400 | 303 | ผ่านน้ำ |
| 5 | Paint4 | 9 – 12 | | | |
| 6 | Paint5 | - | | | |
| 7 | กระดาษ | - | 600 | 303 | ผ่านน้ำ |
| 8 | Paint4 | 9 – 12 | | | |
| 9 | Paint5 | - | | | |
| 10 | Paint4 | 9 – 12 | 400 | 303 | ไม่ผ่านน้ำ |
| 11 | Paint4 | 9 – 12 | | 313 | ผ่านน้ำ |
| 12 | Paint4 | 9 – 12 | | 323 | ผ่านน้ำ |

3.3.5 การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี

ค่าที่บันทึกได้จากการทดลองสามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีได้ ตามสมการที่ 3.3

$$q = \frac{P_T M_{wCO_2} F}{RT m_{paint}} \int_0^t (\%CO_2(in) - \%CO_2(out)) dt \quad (3.3)$$

| | | |
|-------|-------------|---|
| เมื่อ | q | คือ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี (มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อกรัมของสีทาอาคาร) |
| | M_{wCO_2} | คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิโมล) |
| | P_T | คือ ความดันรวมทั้งระบบ (บาร์) |
| | F | คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที) |

| | |
|---------------|---|
| $\%CO_2(in)$ | คือ ร้อยละของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าโดย ปริมาตร (-) |
| $\%CO_2(out)$ | คือ ร้อยละของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกโดย ปริมาตร (-) |
| t | คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท) |
| R | คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (มิลลิลิตร.บาร์ ต่อ มิลลิโมล.เคลวิน) |
| T | คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (เคลวิน) |
| m_{paint} | คือ มวลของสีทาอาคาร (กรัม) |

3.3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จะเลือกใช้ข้อมูลของสีชนิด Paint 4 นำมาใช้คำนวณเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับในสีทาอาคาร โดยจะแบ่งแบบจำลองออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และ แบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's model) ดังแสดงในตารางที่ 9 จากนั้นจะนำค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ สร้างเป็นกราฟเส้นตรงตามสมการในตารางที่ 9 เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลอง การพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการดูดซับของสีทาอาคาร จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) เป็นเครื่องชี้วัดความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการจำลองและข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง

ตารางที่ 9 สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ศึกษา

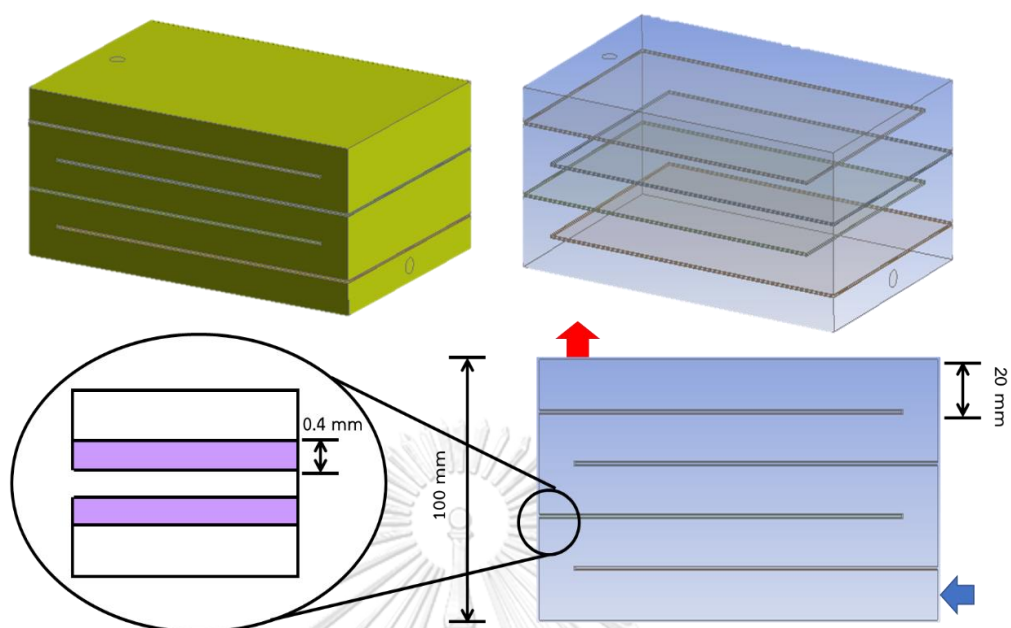
| แบบจำลองจลนพลศาสตร์ | สมการ |
|-----------------------------------|--|
| แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม | $\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$ (2.2) |
| แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม | $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e}$ (2.4) |
| แบบจำลองอาฟรามี่ | $\ln \left(\ln \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right) \right) = n_{av} \ln t + n_{av} \ln k_{av}$ (2.6) |

3.4 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดูดซับของสีทาอาคาร

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาอาคาร มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวผนังจำลองเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว โดยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผนังจำลองที่มีสีทาผนัง และการพัฒนาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวผนังจำลองที่มีการเคลื่อนที่ด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผนังจำลองที่มีสีทาผนัง

การสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผนังจำลองที่มีสีทาผนังที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว จะแบ่งออกเป็น 2 ภูมิภาค ได้แก่ ภูมิภาคแก๊สและของแข็ง โดยใช้ต้นแบบจากเครื่องที่ใช้ในห้องปฏิบัติการตามหัวข้อที่ 3.3.1 ซึ่งจะใช้โปรแกรม Workbench 2020 R2 ในการสร้างรูปร่างพื้นที่การไหลแบบสามมิติ แสดงดังรูปที่ 23 แบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีจะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด กว้าง 149 มิลลิเมตร ยาว 230 มิลลิเมตรสูง 100 มิลลิเมตร สำหรับการจำลองกระดาศที่เคลื่อนที่ ภายในแบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบจะแบ่งเป็น 4 ชั้นสลับซ้ายขวา ขนาดกว้าง 149 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร และหนา 0.8 มิลลิเมตร แต่ละชั้นห่างกัน 20 มิลลิเมตรจากกึ่งกลางชั้น แต่ละชั้นของกระดาศจำลองจะเคลื่อนที่ด้วยตัวดูดซับของแข็ง 2 ด้าน หนาด้านละ 0.4 มิลลิเมตร เพื่อให้แบบจำลองมีความหนาโดยรวมของชั้นกระดาศและสีเคลือบในห้องปฏิบัติการ คือ 1.6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ แก๊สจะเข้าสู่อุปกรณ์ทางด้านล่างทางขวา และแก๊สออกจากอุปกรณ์ทางด้านบนทางซ้าย ซึ่งท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เท่ากับ 16 มิลลิเมตร จากนั้นจะทำการแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็น 4 ค่า คือ 80,000 120,000 160,000 และ 200,000 เซลล์ ดังตารางที่ 10 แล้วนำมาจำลองการไหลด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 2020 R2 เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าปริมาตรควบคุมค่าใดเหมาะสมที่จะทำให้ผลของการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลง และใช้เวลาในการคำนวณต่ำที่สุด



รูปที่ 23 แบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีแบบ 3 มิติ

ตารางที่ 10 ข้อมูลการจำลองในการหาเซลล์การคำนวณที่เหมาะสม

| การทดลอง | จำนวนเซลล์การคำนวณ (เซลล์) | ชั้นเวลา (วินาที) |
|----------|----------------------------|-------------------|
| 1 | 80,000 | 0.01 |
| 2 | 120,000 | 0.01 |
| 3 | 160,000 | 0.01 |
| 4 | 200,000 | 0.01 |

3.4.2 การพัฒนาแบบจำลองที่พิจารณาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนกระตาดจำลองที่มีการเคลือบด้วยสีที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อแสดงผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวกระตาดจำลองที่มีการเคลือบด้วยสี จะเกี่ยวข้องกับความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี (Heat of reaction) การจะได้ผลจำลองที่แม่นยำควรจะใช้ค่าคุณสมบัติในสีต่าง ๆ ให้เสมือนจริงมาก

ที่สุดซึ่งค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากภายในสปีมิ่งค์ประกอบด้วยหลากหลายชนิดผสมกัน อาจมีองค์ประกอบชนิดอื่นนอกจากสารที่สนใจในห้องปฏิบัติการที่ส่งผลต่อความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อมูลเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้น เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง จะกำหนดให้สารที่ใช้เป็นองค์ประกอบของสปีมิ่งค์ในแบบจำลองนี้จะมีเพียง 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์และอะลูมินาเป็นสารอ้างอิง ซึ่งรายละเอียดตัวแปรและรูปแบบการคำนวณที่ใช้ในแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 11 และ 12 นอกจากนี้ จะเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลจากห้องปฏิบัติการด้วยการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส 8.05×10^{-6} กิโลกรัมต่อวินาที (เทียบเท่ากับ 400 มิลลิลิตรต่อนาทีในห้องปฏิบัติการ) จากนั้นจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดานจำลอง โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 3.4.2.1 และ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าในหัวข้อ 3.4.2.2 สำหรับการคำนวณร่วมด้วย

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|--|--|-----------------------------|
| ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ($\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) | 2211/2711/3970 | กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร |
| ค่าเอนทัลปี ($\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) | $(-9.87 \times 10^8)/(-1.21 \times 10^9)/(-1.676 \times 10^9)$ | จูลต่อกิโลโมล |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) | 1180.3/834.3/775.206 | จูลต่อกิโลกรัม ต่อเคลวิน |
| มวลโมเลกุลของสาร ($\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) | 74.093/100.087/101.96 | กิโลกรัมต่อ กิโลโมล |
| เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ของแข็ง | 60 | ไมโครเมตร |
| ความหนาแน่นของแก๊ส ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$) | 1.788/0.554/1.138 | กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร |

ตารางที่ 12 ภาวะดำเนินการและขอบเขต

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|---|---|----------------------------|
| ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง | -9.81 | เมตรต่อวินาที ² |
| ความดันอ้างอิง | 101,325 | ปาสคาล |
| อุณหภูมิอ้างอิง | 298.15 | เคลวิน |
| สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น (Ca(OH) ₂ /CaCO ₃ /Al ₂ O ₃) | 0.105/0.425/0.470 | - |
| สัดส่วนของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น | 0.3 | - |
| สัดส่วนโดยมวลของแก๊สที่ป้อนเข้า (CO ₂ /H ₂ O/N ₂) | 0.09177/0.01252/0.89570 | - |
| อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สที่ป้อนเข้า | 8.05×10 ⁻⁶ | กิโลกรัมต่อวินาที |
| ภาวะผนัง | No-slip condition | - |
| รูปแบบการจำลอง | Eulerian-Eulerian approach Laminar model | - |

3.4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

3.4.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

- สมการอนุรักษ์มวลของวัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (3.4)$$

- สมการอนุรักษ์มวลของวัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial \varepsilon_s \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.5)$$

| | | |
|-------|-----------------|---|
| เมื่อ | ε_g | คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-) |
| | ε_s | คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-) |
| | ρ_g | คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) |
| | ρ_s | คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) |
| | \vec{v}_g | คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที) |
| | \vec{v}_s | คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที) |
| | t | คือ เวลา (วินาที) |

3.4.2.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของวัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} - K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.6)$$

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของวัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.7)$$

| | | |
|-------|--------------------------------|---|
| เมื่อ | $\overline{\overline{\tau}}_g$ | คือ ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล) |
| | $\overline{\overline{\tau}}_s$ | คือ ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล) |
| | p | คือ ความดัน (ปาสคาล) |
| | \vec{g} | คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที ²) |
| | K_{gs} | คือ แบบจำลองความต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส - ของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.วินาที) |

3.4.2.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

- สมการอนุรักษ์พลังงานของวัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g h_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial p_g}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \vec{v}_g + S_g + \vec{Q}_{gs} \quad (3.8)$$

- สมการอนุรักษ์พลังงานของวัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial p_s}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s + S_s + \vec{Q}_{gs} \quad (3.9)$$

เมื่อ h_g คือ เอนทัลปีของวัฏภาคแก๊ส (จุดต่อเคลวิน)

h_s คือ เอนทัลปีของวัฏภาคของแข็ง (จุดต่อเคลวิน)

S_g คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ ในวัฏภาคแก๊ส (จุดต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

S_s คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ ในวัฏภาคของแข็ง (จุดต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

\vec{Q}_{gs} คือ ความเข้มข้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเฟส (จุดต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2.1.4 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบวัฏภาค (Species conservation equation)

- สมการอนุรักษ์พลังงานของวัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g y_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g y_i) = -\nabla \varepsilon_g J_i + r \quad (3.10)$$

- สมการอนุรักษ์พลังงานของวัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s y_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s y_i) = -\nabla \varepsilon_s J_i + r \quad (3.11)$$

เมื่อ y_i คือ สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ i (-)

J_i คือ ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ i (กิโกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

3.4.2.1.5 สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวดแกว่ง (Conservation of solid fluctuating energy equation)

- ภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \theta_s \vec{v}_s) \right] = (-\nabla p_s I + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \theta_s) - \gamma_s \quad (3.12)$$

เมื่อ θ_s คือ พลังงานจลน์เนื่องจากการกวดแกว่งของอนุภาค (ตารางเมตรต่อวินาที²)

k_s คือ พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

γ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที³)

I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)

- สมการเพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลอง

- ความดันของของแข็ง

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e) \varepsilon_s^2 g_0 \theta_s \quad (3.13)$$

และ

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

เมื่อ e คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (-)

g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี (-)

$\varepsilon_{s,max}$ คือ การอัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นที่สุดของสัณฐานโดยปริมาตรของแข็ง

- พลังงานจลน์จากการกวดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ

$$k_s = \frac{150 d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1+e) \varepsilon_s g_0} \left[1 + \frac{6}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 + 2\rho_s \varepsilon_s^2 g_0 d_s (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

- พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$$\gamma_s = \frac{12(1-e^2)\varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta_s^3}{d_s \sqrt{\pi}} \quad (3.16)$$

- ความหนืดแนวเฉือนของวัฏภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{10d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{90(1+e)\varepsilon_s g_0} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 + \frac{4}{5} \rho_s \varepsilon_s g_0 d_s (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

- ความหนืดรวมของวัฏภาคของแข็ง

$$\zeta_s = \frac{4}{3} \rho_s \varepsilon_s g_0 d_s (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

เมื่อ ζ_s คือ ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

- ความเค้นเทนเซอร์

- o วัฏภาคแก๊ส

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g \left(\nabla \cdot \vec{v}_g + (\nabla \cdot \vec{v}_g)^T \right) - \varepsilon_g \left(\frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g I \quad (3.19)$$

- o วัฏภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s \left(\nabla \cdot \vec{v}_s + (\nabla \cdot \vec{v}_s)^T \right) - \varepsilon_s \left(\zeta_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s I \quad (3.20)$$

เมื่อ μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_g คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

3.4.2.2. สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction equation)

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คำนวณจากแบบจำลอง ออฟราเมียที่ได้จากในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะได้ดังแสดงในสมการที่ 3.21

$$r_{fw} = \frac{W_s}{VMw_{CO_2}} q_e \cdot \exp(-(kt)^n) \cdot k^n \cdot n \cdot t^{n-1} \quad (3.21)$$

| | | |
|-------|-------------|--|
| เมื่อ | r_{fw} | คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรวินาที) |
| | W_s | คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กิโลกรัม) |
| | V | คือ ปริมาตรของระบบ (ลูกบาศก์เมตร) |
| | Mw_{CO_2} | คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อกิโลโมล) |
| | t | คือ เวลา (วินาที) |
| | k | คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (วินาที ⁻¹) |
| | n | คือ ค่าคงที่ออฟราเมีย (-) |

บทที่ 4

ผลการทดลอง

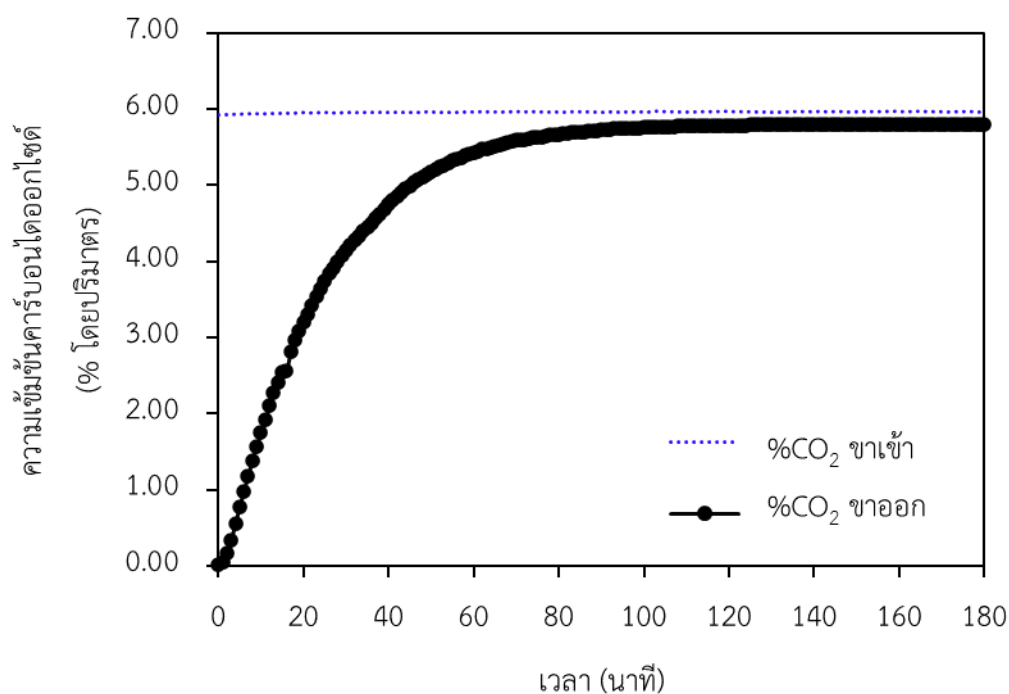
ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารด้วยการเติมตัวดูดซับของแข็ง ผลการดำเนินการจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ผลจากการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารที่ได้รับการปรับปรุงชนิดต่าง ๆ ผลจากการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารที่ได้รับการปรับปรุงในภาวะต่าง ๆ ตลอดจนการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังที่เคลือบด้วยสีทาผนังอาคาร

4.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารที่ได้รับการปรับปรุงชนิดต่าง ๆ

ในงานวิจัยส่วนนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนของตัวดูดซับของแข็งที่เหมาะสมในการเตรียมสีทาผนังอาคาร โดยที่ สัดส่วนของแข็งนั้นจะต้องมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ในขณะที่ด้านคุณภาพของสีที่ผสมขึ้นมานั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสีด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกพิจารณาคุณสมบัติตาม มอก. 285 เล่ม 12 เรื่องเสถียรภาพต่อการเก็บ นั่นคือสีต้องสามารถเก็บรักษาได้โดยที่ไม่เสียรูป [44]

ผลการทดลองส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานำมาใช้งานได้จริง โดยจะทดสอบ 2 ส่วน ได้แก่ การอ่านค่าของอุปกรณ์การวัดและการตรวจสอบการรั่วของแก๊สตามข้อและรอยต่อต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ส่วนแรก จะทดสอบการอ่านค่าของอุปกรณ์การวัดเมื่อทำการทดลองโดยให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากถังแก๊ส 6% โดยปริมาตร อุณหภูมิแก๊สขาเข้าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลผ่านชั้นกระดาษที่ไม่มีการเคลือบสี จากรูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของกล่องทดสอบ จะเห็นว่า ความเข้มข้นที่ทางเข้าจะอยู่ประมาณ 6% โดยปริมาตร ส่วนความเข้มข้นที่ทางออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเวลา 100 นาทีผ่านไป ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งคงที่ พบว่า ที่เวลา 180 นาที ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกมีค่าเท่ากับ 5.95% และ 5.86% โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.83 และ 2.33 ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่อ่านได้จากเซนเซอร์จะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด รุ่น IR270 ในการเทียบ ค่าอัตราการไหลที่อ่านได้จากเซนเซอร์จะเทียบกับตัวควบคุมการไหลรุ่น K-1012 และค่าความ

ต้นเทียบกับตัววัดความดันเกจแบบเข็ม แสดงดังตารางที่ 13 พบว่าค่าที่วัดได้แตกต่างจากค่าที่นำมาเทียบเพียงเล็กน้อยและค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ไม่เกินร้อยละ 5 [45] ส่วนที่สองคือ การตรวจสอบการรั่วของแก๊สตามข้อต่อและรอยเชื่อมต่าง ๆ ได้ทดสอบโดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบให้มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าบรรยากาศและกั้นไว้ดูอัตราการซึมเข้ามาของคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าอัตราการซึมของแก๊สเท่ากับ 0.00043% โดยปริมาตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่านี้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 24 กราฟความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ทางเข้าและทางออกของการทดสอบกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลือบสี

ตารางที่ 13 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์และระบบ

| อุปกรณ์ | ค่าเปรียบเทียบ | ค่าที่วัดได้ | ร้อยละความคลาดเคลื่อน |
|--|----------------------------|--------------|-----------------------|
| เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%) | 6 | 5.95 | 0.83 |
| เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (%) | 6 | 5.86 | 2.33 |
| เซนเซอร์วัดอุณหภูมิขาเข้า (องศาเซลเซียส) | 31.8 | 32.19 | 1.23 |
| เซนเซอร์วัดอุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส) | 31.8 | 32.11 | 0.97 |
| เซนเซอร์วัดความดันสัมบูรณ์ (บาร์) | 1.05 | 1.07 | 1.90 |
| เซนเซอร์วัดอัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที) | 100 | 102 | 2.00 |
| อัตราการซึมของแก๊ส | 0.00043% โดยปริมาตรต่อนาที | | |

ตารางที่ 14 แสดงความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสีที่ไม่ผสมสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตของสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Paint1 Paint2 และ Paint3 ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที แก๊สผ่านน้ำที่ความชื้น 30 – 40%RH และอุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส พบว่า สี Paint2 (สีกิ่งเงา) สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าสี Paint1 (สีด้าน) และ Paint3 (สีเงา) ตามลำดับ เนื่องจากผลของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี กล่าวคือ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดปฏิกิริยากับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [46, 47] แต่สี Paint3 ไม่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตเลย ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี Paint1 และสี Paint2 พบว่า สี Paint2 มีค่าการ

ความสามารถในการดูดซับมากกว่าสี Paint1 แม้ว่าในสี Paint2 จะมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต น้อยกว่าในสี Paint1 แต่ค่าความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันเพียง 0.022 มิลลิกรัม คาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี จึงได้พิจารณาผลของการดูดซับทางกายภาพร่วมด้วย พบว่า ในสี Paint2 มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่าในสี Paint1 ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิด การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทางกายภาพได้ด้วยที่ภาวะของงานวิจัยนี้ [48] รวมถึงไทเทเนียมได ออกไซด์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและอะลูมิเนียมซิลิเกต [49-51] จึง ส่งผลให้สี Paint2 มีค่าความสามารถมากกว่า

ตารางที่ 14 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ไม่มีการผสมสารดูดซับ

| ชนิดสี | ความสามารถในการดูดซับ CO ₂ ในสีทาทนัง (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อกรัมของสี) |
|--------------------|--|
| Paint1 (สีดำ) | 0.414 |
| Paint2 (สีกิ่งเงา) | 0.436 |
| Paint3 (สีเงา) | 0.284 |

ตารางที่ 15 แสดงความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมสารดูดซับ โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของการใส่สารดูดซับลงในสี พบว่า ในสีชนิดเดียวกัน ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมสารดูดซับจะแปรผันตามปริมาณสาร ดูดซับที่ผสมลงในสี กล่าวคือ สารดูดซับโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตสามารถเกิดปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนรูปเป็นโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตได้ ดังสมการที่ 3.1 ซึ่งหากปริมาณ สารตั้งต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน [35]

ตารางที่ 15 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นสารดูดซับ

| ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ความสามารถในการดูดซับ CO ₂ ในสีทาผนัง (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อกรัมของสี) |
|-----------------------|--|--|
| Paint1 (สีดำน) | 0.2 | 0.417 |
| | 0.5 | 0.853 |
| | 1.0 | 1.338 |
| Paint2 (สีกึ่งเงา) | 0.2 | 0.439 |
| | 0.5 | 0.572 |
| | 1.0 | 0.643 |
| Paint3 (สีเงา) | 0.2 | 0.288 |
| | 0.5 | 0.576 |
| | 1.0 | 0.866 |

ตารางที่ 16 17 และ 18 แสดงความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นของสีที่ผสมสารดูดซับเปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับเมื่อเป็นชนิดสีเดียวกัน จากข้อมูลพบว่า ที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี Paint1 เพิ่มขึ้นสูงสุด 2.23 เท่า ซึ่งมากกว่าสี Paint3 และ Paint2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ เนื่องจาก ลักษณะทางกายภาพของสีทั้ง 3 ชนิดหลังทาเคลือบลงบนกระดาษแล้วจะพบว่า สี Paint1 จะมีลักษณะด้าน ไม่มีการสะท้อนแสง สี Paint2 มีลักษณะกึ่งเงา นั่นคือ สีเกิดการสะท้อนแสงและพื้นผิวมีความลื่นเล็กน้อย และสี Paint3 มีลักษณะเงา คือ สีเกิดการสะท้อนแสงมากกว่าแบบกึ่งเงา รวมถึงพื้นผิวค่อนข้างเรียบและลื่นมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 25, 26 และ 27 ตามลำดับ หากพิจารณาเฉพาะผลของความเงา สี Paint1 หรือสีดำน มีสารที่ทำให้เกิดความเงา น้อยสุด และ Paint3 หรือสีเงา มีสารที่ทำให้เกิดความเงามากที่สุด และพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีชนิดสีเงาจะน้อยกว่าสีชนิดสีดำน เนื่องจาก สารที่ทำให้เกิดความเงานี้จะไปเคลือบบริเวณพื้นผิวของสี ส่งผลให้ลดโอกาสของแก๊สและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้ามาสัมผัสกับสารดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมียากขึ้น ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีเงา จึงต่ำกว่าสีดำน ในทุก ๆ สัดส่วนที่เท่ากันของสารดูดซับ

ตารางที่ 16 ความสามารถในการดักจับของสี Paint1 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ

| ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ได้ผสมสารดูดซับ (ร้อยละ) |
|--------|--|--|
| | 0.0 | 0.00 |
| Paint1 | 0.2 | +0.01 |
| (สีดำ) | 0.5 | +1.06 |
| | 1.0 | +2.23 |

ตารางที่ 17 ความสามารถในการดักจับของสี Paint2 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ

| ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ได้ผสมสารดูดซับ (ร้อยละ) |
|-------------|--|--|
| | 0.0 | 0.00 |
| Paint2 | 0.2 | +0.01 |
| (สีกิ่งเงา) | 0.5 | +0.31 |
| | 1.0 | +0.47 |

ตารางที่ 18 ความสามารถในการดักจับของสี Paint3 เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ

| ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับสีที่ไม่ได้ผสมสารดูดซับ (ร้อยละ) |
|---------|--|--|
| | 0.0 | 0.00 |
| Paint3 | 0.2 | +0.01 |
| (สีเงา) | 0.5 | +1.03 |
| | 1.0 | +2.05 |



รูปที่ 25 ลักษณะสีด้าน (Paint1) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ



รูปที่ 26 ลักษณะสีกึ่งเงา (Paint2) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ



รูปที่ 27 ลักษณะสีเงา (Paint3) หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาชนิดของสีที่สัดส่วนสารดูดซับเท่ากัน พบว่า สีแต่ละชนิดให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ชนิดของสีส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี จากตารางที่ 14 และ 15 จะเห็นว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ สีกึ่งเงาจะสามารถดูดซับได้มากที่สุด รองลงมา คือ

สีด้าน และ สีเงา ตามลำดับ เมื่อสีผสมสารดูดซับที่ 0.2% โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการดูดซับ ยังคงเป็นแนวโน้มเดิม คือ สีเงา > สีด้าน > สีเงา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารดูดซับให้มากขึ้นเป็น 0.5 และ 1% โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับของสีทั้ง 3 ชนิดนี้มีแนวโน้มเปลี่ยนไปเป็น สีด้าน > สีเงา > สีเงา จึงได้พิจารณาส่วนของลักษณะทางกายภาพของสีก่อนทาและหลังทาเคลือบ ลงบนกระดาษเพิ่มเติม แสดงดังตารางที่ 19 พบว่า สี Paint2 ที่สัดส่วนสารดูดซับร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก มีลักษณะเป็นเจลตั้งแต่ก่อนเริ่มทา ลักษณะที่เกิดขึ้นหลังทาเคลือบลงบนกระดาษ คือ สีมี ความเป็นก้อนที่ผิวกระดาษ เนื้อสีไม่เรียบสม่ำเสมอไม่ขึ้นรูป การที่สีมีลักษณะจับตัวเป็นก้อนเจลจะ ส่งผลให้สีเสื่อมสภาพและใช้การไม่ได้ แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นในสี จึงเกิดการจับตัวเป็นก้อนเจลเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อนำมา ทดลองการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ค่าที่ได้จึงค่อนข้างน้อย

ตารางที่ 19 ลักษณะของสีก่อนทาและหลังทา

| ชนิดสี | สัดส่วนสารดูดซับในสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ลักษณะสีที่สังเกตได้ ก่อนทา | ลักษณะสีที่สังเกตได้ หลังทา |
|--------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Paint1 | 0 | เหลว | ขาวด้าน |
| | 0.2 | เหลว | |
| | 0.5 | เหลว | |
| | 1.0 | เหลว | |
| Paint2 | 0 | เหลว | ขาวกึ่งด้านกึ่งเงา |
| | 0.2 | เหลว | |
| | 0.5 | เหลว | |
| | 1.0 | เจล | |
| Paint3 | 0 | เหลว | ขาวเงา |
| | 0.2 | เหลว | |
| | 0.5 | เหลว | |
| | 1.0 | เหลว | |

นอกจากนี้ ทางบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) ได้นำสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Paint1 Paint2 และ Paint3 ที่ผสมสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตสัดส่วนต่าง ๆ จำนวนหนึ่งไปทดสอบคุณภาพ

ของสี เพื่อศึกษาเสถียรภาพในการเก็บรักษา โดยทางบริษัทจะนำตัวอย่างสีไปเก็บไว้ในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า หลังการอบเป็นเวลา 2 สัปดาห์ คุณภาพสีที่ได้ ไม่ผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 285 เล่ม 12-2560 [44] แม้สีที่มีการผสมสารดูดซับและปรับสัดส่วนใหม่จะสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่คุณภาพสีไม่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ ดังนั้น จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อผสมสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงในสี สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริง แต่ในเรื่องของผลกระทบของสารดูดซับชนิดนี้ต่อองค์ประกอบบางชนิดในสียังไม่ชัดเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบใดในสี เพื่อที่จะอธิบายผลว่า สารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อองค์ประกอบภายในสีมากน้อยเพียงใด

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารดูดซับอีกชนิดหนึ่งเพิ่มเติม คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และน้ำได้ ดังสมการที่ 3.2 อีกทั้ง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของเนื้อสีทุกประเภท จึงมีความเป็นไปได้ว่าอาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพสีไม่มากเท่ากับสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 20 แสดงความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ Paint4 และสีที่ไม่ผสมสารดูดซับ หรือ Paint5 ในการทดลองนี้สีที่จะนำมาเทียบเป็นสีอ้างอิง จะเป็นสีน้ำเกรตบน เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีเมื่อมีการผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไป เนื่องจากสัดส่วนหลักของสี Paint4 ชนิดนี้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่มีองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และอะลูมิเนียมซิลิเกต (Al_2SiO_3) เลย ขณะที่สีอ้างอิง หรือ Paint5 จะไม่มีสัดส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เลย แต่จะมีสัดส่วนของสารอื่นตามปกติ ลักษณะสีหลังทาเคลือบลงบนกระดาษแสดงดังรูปที่ 28 และ 29 พบว่า เมื่อป้อนแก๊สขึ้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านบนสี Paint4 สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 5.40 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี มีค่าสูงกว่าสีอ้างอิง หรือ Paint5 ซึ่งมีค่า 0.06 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี นอกจากนี้ คุณภาพของสีชนิดนี้ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมเบื้องต้น [44] ตามกระบวนการทดสอบของบริษัท ดังนั้น จึงเลือกสีชนิดนี้ไปใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของภาวะต่อไป

ตารางที่ 20 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์
เป็นสารดูดซับเปรียบเทียบกับสีอ้างอิง

| ชนิดสี | ความสามารถในการดูดซับ CO ₂ ในสีทาผนัง (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อกรัมของสี) |
|--------------------|--|
| Paint4 (สีด้าน) | 5.40 |
| Paint5 (สีด้าน) | 0.06 |



รูปที่ 28 สี Paint4 หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ

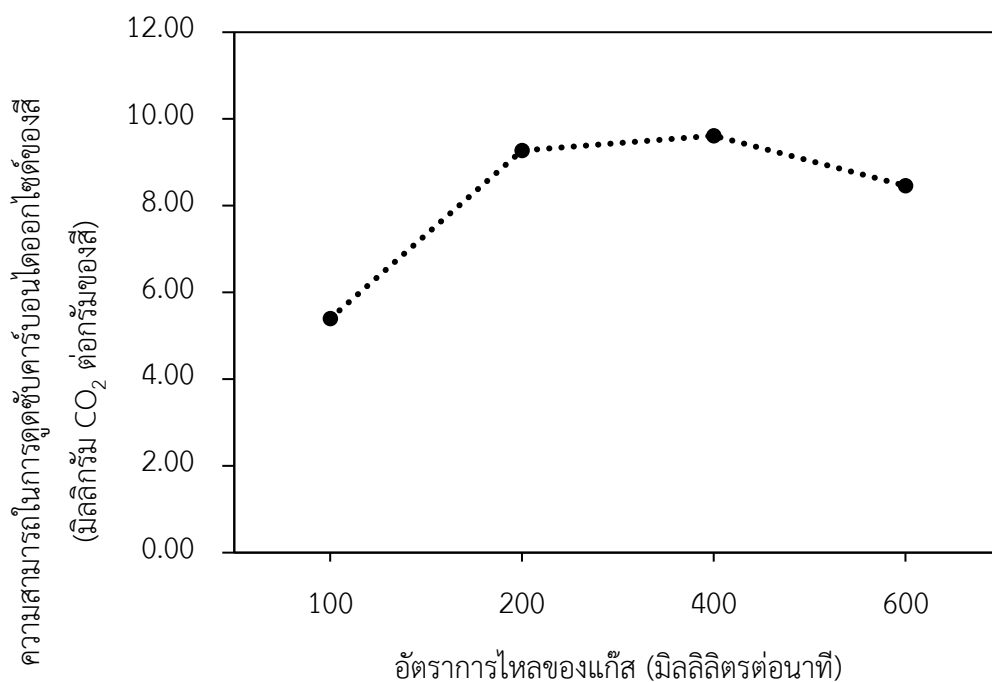


รูปที่ 29 สี Paint5 หลังทาเคลือบลงบนกระดาษ

4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาผนังอาคารที่มีตัวดูดซับในภาวะต่าง ๆ

รูปที่ 30 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีที่มีการผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาอัตราการไหลที่ 100 200 400 และ 600 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 – 50%RH สำหรับแก๊สที่ผ่านน้ำ และไม่ผ่านเครื่องให้ความร้อน เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 160 นาที พบว่า ในช่วงอัตราการไหล 100 ถึง 200 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น แต่สำหรับช่วงอัตราการไหล 200 ถึง 400 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเพิ่มเป็น 600 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส ส่งผลให้ค่าความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สในกรอบเวลาเดียวกัน จะเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้น นั่นคือ การเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับระบบ ทำให้ระบบมีสารตั้งต้นมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาดูดซับตามสมการที่ 3.2 ได้มากขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงสูงขึ้น

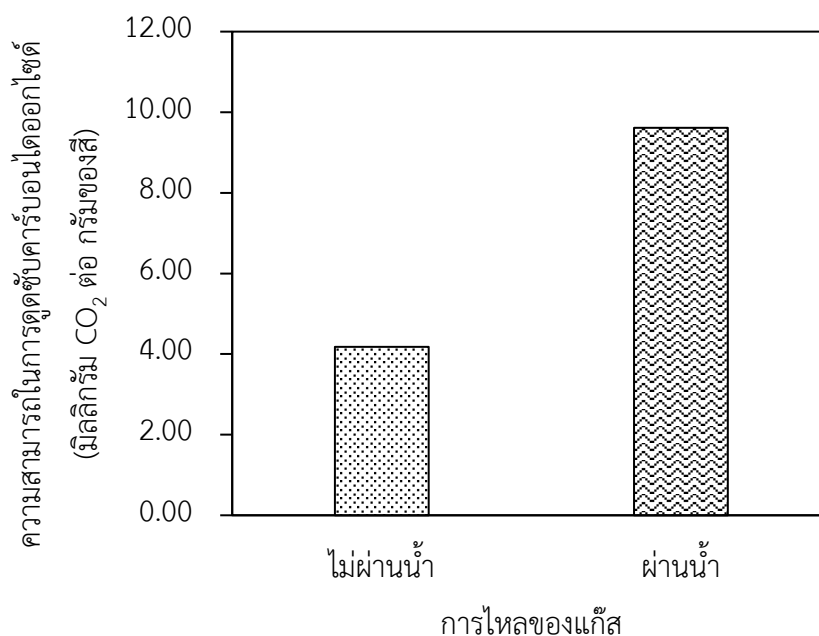
อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราการไหลไปถึงค่า ๆ หนึ่ง ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยระยะเวลาในการสัมผัสกันของแก๊สและสารดูดซับในสี กล่าวคือ ในกรอบพื้นที่ผิวที่เท่ากัน เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความเร็วของแก๊สที่ผ่านพื้นที่ผิวนั้นจะเพิ่มขึ้น จนเกิดความปั่นป่วนบริเวณชั้นฟิล์มบนตัวดูดซับ ซึ่งจะเพิ่มโอกาสของแก๊สในการเข้าถึงตัวดูดซับมากขึ้น แต่ถ้าความเร็วที่ผ่านกรอบพื้นที่ผิวนั้นมากเกินไป จะทำให้ระยะเวลาในการที่แก๊สจะอยู่ในกรอบพื้นที่ผิวนั้นน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณแก๊สที่จะเคลื่อนที่ไปยังตัวดูดซับลดลง ค่าความสามารถในการดูดซับจึงลดลง [35] ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า อัตราการไหลที่ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 9.61 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี



รูปที่ 30 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในซีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ

รูปที่ 31 แสดงผลของความชื้นในแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในซีที่มีการผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแบ่งแก๊สที่ใช้ทดสอบเป็นแบบผ่านน้ำและไม่ผ่านน้ำ ซึ่งแก๊สที่ไหลผ่านน้ำจะกำหนดให้มีความชื้นเริ่มต้นก่อนเข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง 40 – 50 %RH ส่วนแก๊สที่ไม่ไหลผ่านน้ำจะกำหนดให้มีความชื้นเริ่มต้นก่อนเข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง 10 – 20 %RH ทดสอบที่ภาวะอัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส ไม่ผ่านเครื่องให้ความร้อน พบว่า แก๊สที่ไหลผ่านน้ำจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าแก๊สที่ไม่ได้ไหลผ่านน้ำ โดยความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สที่ไหลผ่านน้ำและไม่ผ่านน้ำ มีค่าเท่ากับ 9.61 และ 4.18 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของซี ซึ่งมากกว่า 1.3 เท่า แสดงให้เห็นว่าความชื้นของแก๊สส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของซีที่มีการผสมตัวดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก ปริมาณความชื้นในแก๊สจะช่วยในเรื่องของการเปลี่ยนรูปเป็นไอออนของสาร กล่าวคือ เมื่อพิจารณาส่วนของกลไกการแตกตัวของสารก่อนจะเกิดปฏิกิริยา การที่ปริมาณความชื้นในระบบเพิ่มขึ้นนี้ ไอออนในแก๊สจะไปเกาะบนผิวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ca^{2+} และ OH^-) อีกทั้งไอออนในแก๊สที่รวมตัว

กับคาร์บอนไดออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ได้เป็น CO₃²⁻ ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Ca²⁺ + CO₃²⁻ → CaCO₃) [39] ดังนั้นระบบที่มีความชื้นสูงกว่าจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาดูดซับได้ดีกว่า



รูปที่ 31 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อแก๊สที่ผ่านน้ำและไม่ผ่านน้ำ ที่อัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 21 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีต่ออุณหภูมิต่าง ๆ การศึกษาผลของอุณหภูมิของแก๊สต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยให้แก๊สไหลผ่านเครื่องให้ความร้อนในปริมาณสูง เพื่อปรับอุณหภูมิของแก๊สให้เป็นไปตามภาวะที่กำหนด (Preheat) จากนั้น ดึงแก๊สบางส่วนมาใช้ในการทดสอบ แก๊สส่วนที่เหลือจะถูวนกลับไปเข้าเครื่องให้ความร้อนอีกครั้ง โดยศึกษาอุณหภูมิแก๊สขาเข้าที่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส แก๊สผ่านน้ำที่ความชื้น 35 – 45 %RH อัตราการไหลของแก๊สเป็น 400 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีจะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือปฏิกิริยาดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาได้

[35] ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผสมในสีจึงมีค่าลดลง ข้อจำกัดของการศึกษาอุณหภูมิในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์ที่ออกแบบมาสามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ทำให้ไม่สามารถทดสอบอุณหภูมิที่สูงกว่า 50 องศาเซลเซียสได้

ตารางที่ 21 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออุณหภูมิแก๊สที่เปลี่ยนแปลง

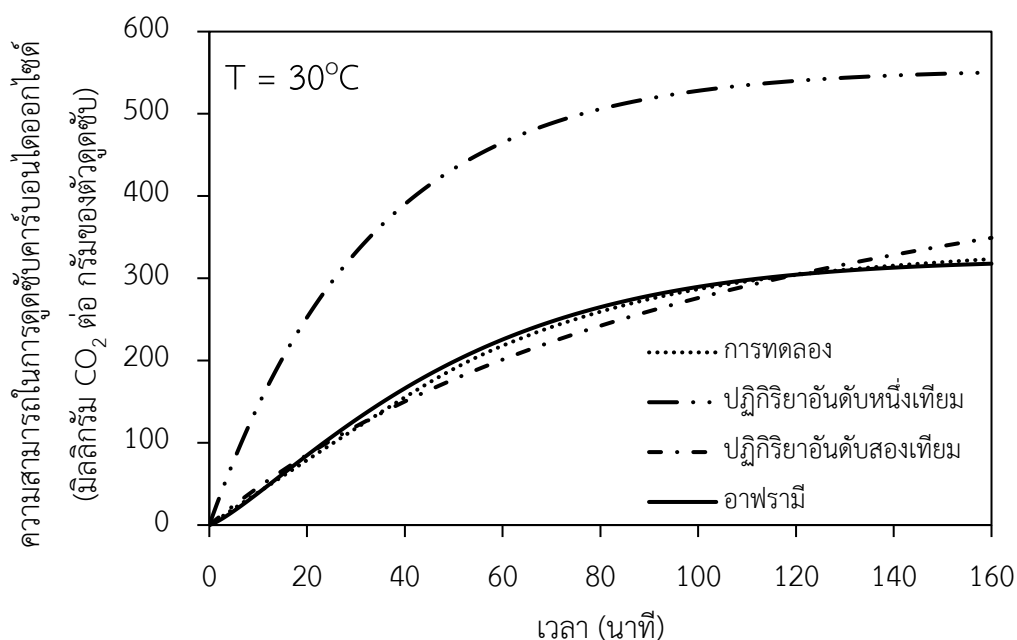
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | 30 | 40 | 50 |
|---|-------|-------|-------|
| ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อกรัมของสี) | 33.95 | 29.46 | 12.95 |

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี

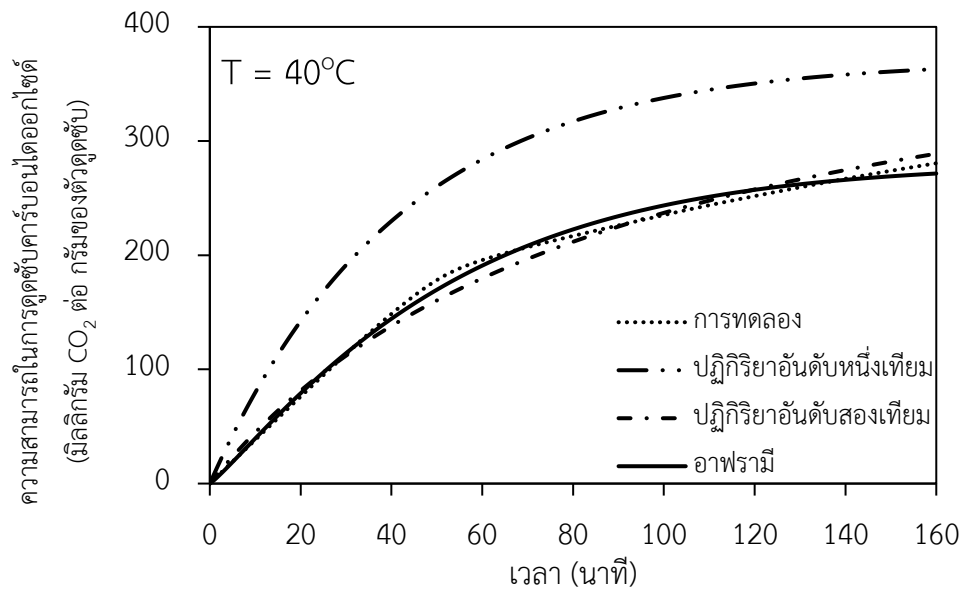
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลอง 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และ แบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's model) เพื่อจะหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นของสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสี ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาในส่วนอื่น ๆ ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีต่อไป โดยจะนำข้อมูลความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจากการทดลองเทียบกับปริมาณของตัวดูดซับ มาใช้ในการสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และพิจารณาหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี ข้อมูลการทดลองที่จะนำมาหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม คือ ที่ภาวะดำเนินการ อัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที ความชื้นเริ่มต้นของแก๊ส 35 – 45 %RH ระยะเวลาในการดูดซับ 160 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 22

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างเป็นกราฟตามสมการที่ 2.2 2.4 และ 2.6 จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองได้ดังตารางที่ 22 และ เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 32 พบว่า จากทั้ง 3 แบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) ของแบบจำลองอาฟ

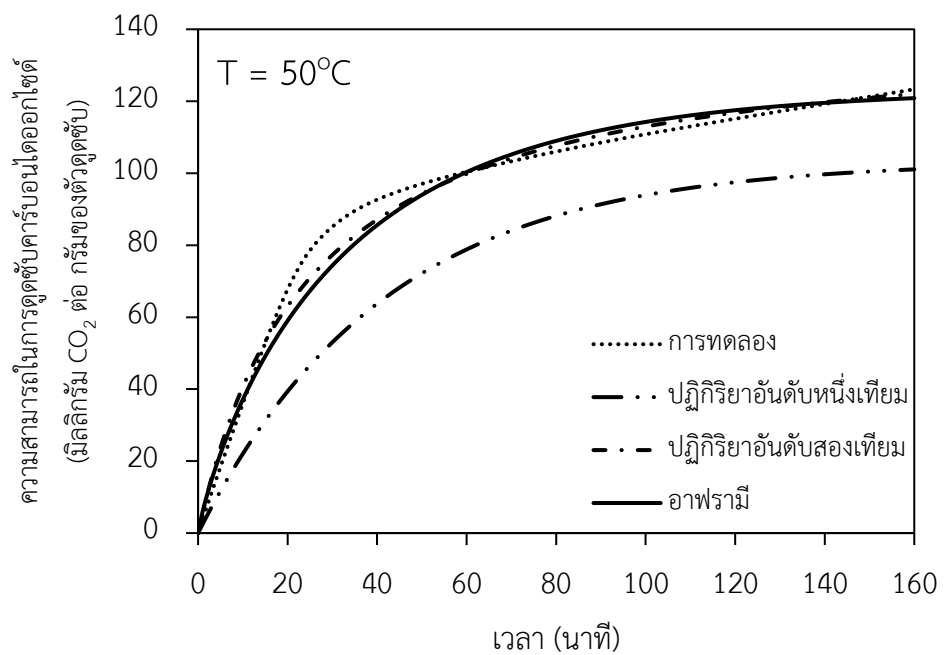
รามมี มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด อีกทั้ง เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลองพบว่า แบบจำลองอาฟรามมีให้ค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) ต่ำที่สุด คือ ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9685 – 0.9899 และค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.19% แสดงว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับในสี่ของงานวิจัยนี้ได้ ในขณะที่แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9282 - 0.9955 และค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 7.98% และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด คือ ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.8986 - 0.9224 และค่าความคลาดเคลื่อนจะไม่เกิน 70.16% ตามลำดับ จากสมมติฐานการดูดซับของแต่ละแบบจำลองจะมีกลไกการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม มีการแพร่เป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตรา ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับทางกายภาพ [20] สำหรับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตรา ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับทางเคมี [20] และแบบจำลองอาฟรามมี จะใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่มีความซับซ้อน กล่าวคือ ในระบบอาจเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไกหรือเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน [20] ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีมากกว่าหนึ่งกลไกสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นไอออนให้สามารถเกิดปฏิกิริยากันได้ [39]



(ก) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

รูปที่ 32 ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีกึ่งผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ (ค) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 22 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับในสี่ของตัวดูดซับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | 30 | 40 | 50 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $q_{e,exp}$ (mg-CO ₂ /g-Ca(OH) ₂) | 323.37 | 280.52 | 123.33 |
| แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม | | | |
| $q_{e,model}$ (mg-CO ₂ /g-Ca(OH) ₂) | 550.24 | 362.99 | 101.07 |
| k_1 (min ⁻¹) | 0.0304 | 0.0242 | 0.0240 |
| R ² | 0.9224 | 0.8986 | 0.9043 |
| Error (%) | 70.16 | 29.40 | 18.05 |
| แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม | | | |
| q_e (mg-CO ₂ /g-Ca(OH) ₂) | 349.19 | 288.91 | 122.03 |
| k_2 (mg-CO ₂ /g-Ca(OH) ₂ .min ⁻¹) | 1.26x10 ⁻⁵ | 2.40x10 ⁻⁵ | 2.90x10 ⁻⁴ |
| R ² | 0.9282 | 0.9639 | 0.9955 |
| Error (%) | 7.98 | 2.99 | 1.05 |
| แบบจำลองอาฟรามี่ | | | |
| q_e (mg-CO ₂ /g-Ca(OH) ₂) | 317.7 | 271.56 | 120.86 |
| k_a (min ⁻¹) | 0.0192 | 0.0187 | 0.0304 |
| n_a | 1.25 | 1.13 | 0.86 |
| R ² | 0.9899 | 0.9899 | 0.9685 |
| Error (%) | 1.75 | 3.19 | 2.00 |

สมการค่าคงที่อัตราการดูดซับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากสมการอาเรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 โดยนำค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองอาฟรามี่สร้างกราฟตามสมการ ให้แกน x แทน 1/T และ แกน y แทน ln(K) จะสามารถหาค่าคงที่อาเรเนียสได้เท่ากับ 26.13 นาที่⁻¹ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา เท่ากับ 18.39 กิโลจูลต่อโมล

$$k = A * \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (4.2)$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | k | คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (นาที่ ⁻¹) |
| | A | คือ ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส (นาที่ ⁻¹) |
| | E_a | คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (กิโลจูลต่อโมล) |
| | R | คือ ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ (จูลต่อโมล.เคลวิน) |
| | T | คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) |

4.4 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังที่เคลือบด้วยสีที่ปรับปรุงสมบัติการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

4.4.1 การทดสอบปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ (Mesh independent test)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จำนวนเซลล์จะส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง กล่าวคือ แบบจำลองที่ใช้เซลล์ความละเอียดต่ำ จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองลู่ออกจากคำตอบ ในขณะที่แบบจำลองที่ใช้เซลล์ความละเอียดสูง จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองลู่ออกสู่คำตอบ และคำตอบมีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองที่มีเซลล์ความละเอียดสูงก็จะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการจำลองนานมากขึ้น ดังนั้น การหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่จะทำให้ผลของการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลง และใช้เวลาในการคำนวณต่ำที่สุด

ตารางที่ 23 แสดงผลของความผันผวนภายในแบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ปริมาตรควบคุมแตกต่างกัน 4 ค่า จากผลการจำลอง พบว่า ปริมาตรควบคุมขนาด 160,000 เซลล์ ให้ค่าความผันผวนภายในอุปกรณ์ทดสอบใกล้เคียงกับปริมาตรควบคุมขนาด 200,000 เซลล์ และมีความแตกต่างกันระหว่างปริมาตรควบคุมขนาด 8,000 และ 120,000 เซลล์ แสดงว่าปริมาตรควบคุม 120,000 เซลล์ มีความละเอียดไม่เพียงพอต่อการคำนวณ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาตรควบคุมเซลล์เป็น 200,000 เซลล์ พบว่าความผันผวนในเฉลี่ยวัดไม่ได้ต่างกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.00063% ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาตรควบคุม 160,000 เซลล์ ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังเมื่อเกิดการดูดซับ เนื่องจากใช้เวลาต่ำที่สุดใน การจำลองและยังให้ผลการจำลองที่แม่นยำ

ตารางที่ 23 ค่าความดันเฉลี่ยภายในแบบจำลองอุปกรณ์ทดสอบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี

| จำนวนเซลล์การคำนวณ (เซลล์) | ความดันเฉลี่ยภายในอุปกรณ์ทดสอบ (ปาสคาล) | ความคลาดเคลื่อน (%) |
|-------------------------------|--|------------------------|
| 80,000 | 99999.83 | - |
| 120,000 | 100299.84 | 0.30001 |
| 160,000 | 100325.00 | 0.02508 |
| 200,000 | 100325.63 | 0.00063 |

4.4.2 ผลของแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดาดจำลองที่มีการเคลือบด้วยสีที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดาดจำลองที่มีการเคลือบสีนั้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดาดจำลองเกิดจากการคายความร้อนของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่อยู่บนกระดาดจำลอง และพฤติกรรมของของไหลภายในระบบ โดยตัวดูดซับที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมคาร์บอเนตและไอน้ำ ดังสมการที่ 3.2 อีกทั้งแบบจำลองนี้ใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของอาพรามี่ดังสมการที่ 3.21 จะเห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับน้ำหนักของตัวดูดซับ (W_s) ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และเวลา (t) แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดไปเรื่อย ๆ จนตัวดูดซับหมด แต่จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจะเห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ ดังนั้น เพื่อให้สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ จึงกำหนดเงื่อนไขในการหยุดการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัดส่วนโดยมวลของตัวดูดซับเหลือ 0.08 เนื่องจากเป็นสัดส่วนโดยมวลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจพบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 24 ซึ่งจะพบว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลอง 0 - 21 วินาที จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองเท่ากับ 13.58 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับห้องปฏิบัติการมากที่สุด กล่าวคือ มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากห้องปฏิบัติการที่ 13.43 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี จึงเลือกเวลาจำลองที่ 21 วินาทีในการศึกษาผลของอุณหภูมิจึงเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

$$r_{fw} = \frac{W_s}{VMW_{CO_2}} q_e \cdot \exp(-(kt)^n) \cdot k^n \cdot n \cdot t^{n-1} \quad (3.21)$$

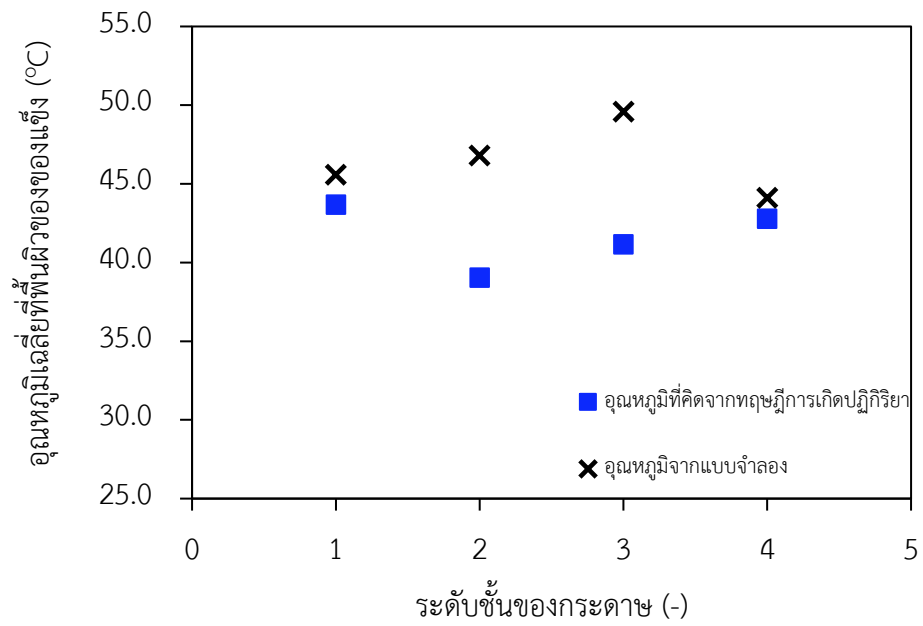
ตารางที่ 24 ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองที่สัดส่วนโดยมวลเฉลี่ยของของแข็ง ณ เวลาในการจำลองใด ๆ

| เวลา (วินาที) | สัดส่วนโดยมวลเฉลี่ยของของแข็ง (-) | ความสามารถในการดูดซับ CO ₂ จากแบบจำลอง (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี) |
|---------------|-----------------------------------|---|
| 0 | 0.105 | 0.00 |
| 3 | 0.102 | 1.49 |
| 6 | 0.098 | 3.44 |
| 9 | 0.094 | 5.74 |
| 12 | 0.089 | 8.31 |
| 15 | 0.084 | 10.60 |
| 18 | 0.081 | 12.44 |
| 21 | 0.079 | 13.58 |
| 24 | 0.077 | 14.25 |
| 27 | 0.077 | 14.67 |

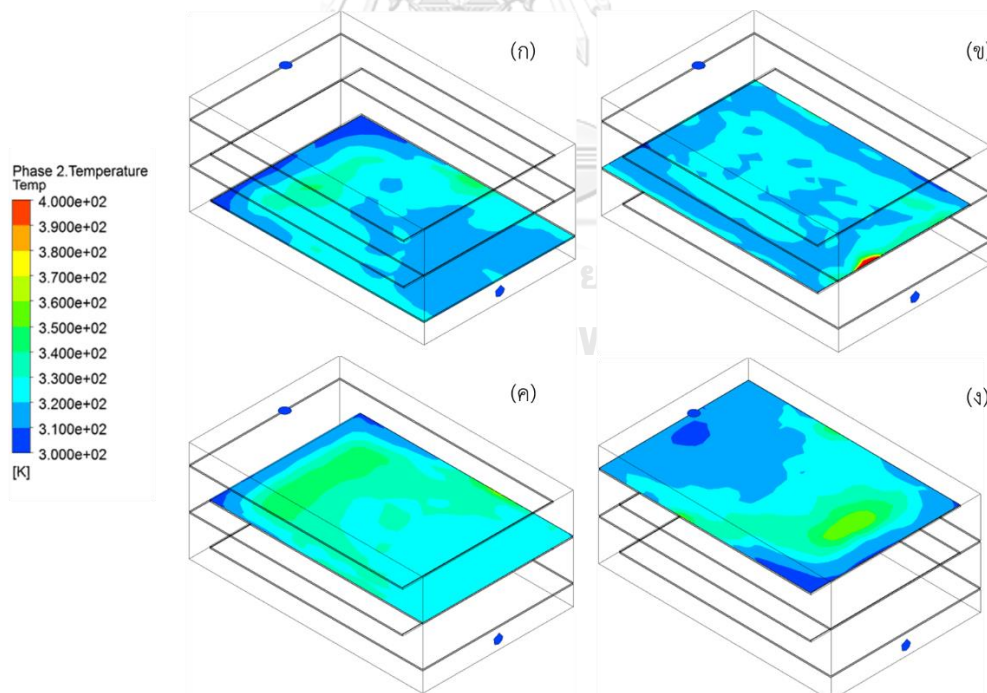
รูปที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวกระดาษจำลองเมื่อคิดจากปฏิกิริยาตามทฤษฎีกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองของแต่ละชั้นที่เวลา 21 วินาที โดยการคิดอุณหภูมิจากปฏิกิริยาตามทฤษฎี จะนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณหาความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาตามทฤษฎี แล้วนำความร้อนไปคิดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการคำนวณนี้จะไม่ได้รวมการถ่ายโอนความร้อนระหว่างกระดาษและจากผิวกระดาษสู่ภูมิภาคแก๊ส พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยา (Heat of reaction) ซึ่งมีเฉพาะปัจจัยของน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ไปเท่านั้น ไม่รวมผลจากพฤติกรรมกรไหลอื่น ๆ เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ อุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 1 > 4 > 3 > 2 แสดงว่าอุณหภูมิของกระดาษจำลองชั้นที่ 1 (ล่างสุด) เกิดปฏิกิริยาการดูดซับมากที่สุด เนื่องจากกระดาษจำลองชั้นล่างมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกป้อนเข้ามาใหม่ตลอดเวลา และกระดาษจำลองชั้นที่ 4 (บนสุด) เกิดปฏิกิริยาการดูดซับรองลงมา เนื่องจากบริเวณด้านบนจะมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของแก๊สและการลดขนาด

พื้นที่หน้าตัดบริเวณทางออก จึงเกิดการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือในระบบ ส่วนชั้นที่ 3 และ 2 เกิดปฏิกิริยาการดูดซับลดลงตามลำดับเนื่องจากความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไปที่ กระดาษจำลองชั้นก่อนหน้า และกระดาษจำลองบริเวณชั้น 3 เริ่มมีการสะสมของแก๊สในระบบ ในขณะที่กระดาษจำลองชั้นที่ 2 ยังไม่มีการสะสมของแก๊สในระบบ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการไหลของแก๊สร่วมด้วย อุณหภูมิเฉลี่ยบนกระดาษจำลอง แต่ละชั้นที่ได้จากแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 33 จะเห็นว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของกระดาษจำลองชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 4 มีค่าต่างจากอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับเพียงเล็กน้อย ในขณะที่กระดาษจำลองชั้นที่ 2 และ 3 จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยคำนวณโดยแบบจำลองต่างจากอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ อุณหภูมิจากปริมาณสารดูดซับที่เกิดปฏิกิริยามากกว่า ตามลำดับ ความแตกต่างนี้เกิดจากอิทธิพลของ ตำแหน่งการวางกระดาษจำลอง กล่าวคือ กระดาษจำลองชั้นที่ 1 ตั้งอยู่ใกล้บริเวณทางเข้าของแก๊ส จึงได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สขาเข้าที่ถูกป้อนเข้ามาที่ 30 องศาเซลเซียสตลอดเวลา ซึ่งแก๊สจะพา ความร้อนจากกระดาษจำลองชั้นที่ 1 ไปสะสมยังชั้นบน รวมถึงความร้อนจะเคลื่อนจากกระดาษส่วน ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วย ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของกระดาษจากแบบจำลองชั้น 2 และ 3 สูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองของกระดาษจำลองชั้นที่ 4 บริเวณใกล้ทางออก ของแก๊ส ซึ่งมีการพาความร้อนออกจากระบบตลอดเวลา ส่งผลให้อุณหภูมิของกระดาษจำลองบริเวณ นั้นมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 34 เป็นภาพคอนทัวร์อุณหภูมิบนกระดาษจำลองแต่ละ ชั้นที่เวลาในการจำลอง 21 วินาที



รูปที่ 33 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวกระดาดจำลองเมื่อคิดจากทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองที่เวลาจำลองเท่ากับ 21 วินาที



รูปที่ 34 คอนทัวร์อุณหภูมิบนกระดาดจำลองแต่ละชั้นที่เวลาจำลอง 21 วินาที
 (ก) อุณหภูมิของกระดาดจำลองชั้นที่ 1 (ข) อุณหภูมิของกระดาดจำลองชั้นที่ 2
 (ค) อุณหภูมิของกระดาดจำลองชั้นที่ 3 และ (ง) อุณหภูมิของกระดาดจำลองชั้นที่ 4

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์เรื่องการเพิ่มมูลค่าสีทาผนังอาคารโดยการปรับปรุงสมรรถนะในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นี้ เป็นงานวิจัยที่ทำร่วมกับบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (มหาชน) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ข้อ ได้แก่ วัตถุประสงค์แรก คือ การพัฒนาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีทาผนังอาคารด้วยการเติมตัวดูดซับของแข็งลงในสีและหาสัดส่วนของตัวดูดซับที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า สีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นอกจากจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แล้ว คุณสมบัติจะต้องผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสีที่ใช้ในการก่อสร้างและตกแต่งด้วย เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้อนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองกำหนดสัดส่วนการผสมสารดูดซับลงในสี และทางบริษัทเป็นผู้เตรียมสีตามสัดส่วนที่ผู้วิจัยออกแบบและสามารถใช้งานได้ วัตถุประสงค์ที่สอง คือ การศึกษาความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วที่ภาวะต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งได้มีการทดสอบ 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊ส และความชื้น วัตถุประสงค์สุดท้าย คือ การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของกระดาศที่มีการเคลือบด้วยสีทาผนังอาคารแบบปรับปรุงคุณสมบัติแล้วใช้เป็นตัวแทนของผนังอาคารเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังเมื่อเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีทาอาคาร

เพื่อให้วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้สำเร็จ จึงได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีให้มีลักษณะการไหลของอากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์มาบนผิวกระดาศเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการสัมผัสกับผิวหน้าของกระดาศและเกิดปฏิกิริยาการดูดซับขึ้น โดยอุปกรณ์ทดสอบที่สร้างขึ้น จะใช้ภาวะอ้างอิงบรรยากาศของประเทศไทย ได้แก่ ความดันประมาณ 1 บรรยากาศ อุปกรณ์ เช่น ข้อต่อและท่อบางส่วนจะสามารถทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ทดสอบการดูดซับและกล่องใส่เซนเซอร์สามารถทนอุณหภูมิได้สูง เพราะวัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส และเซนเซอร์ต่าง ๆ สามารถทนอุณหภูมิได้แค่ในระดับหนึ่งตามช่วงที่เลือกใช้ ในบทที่ 3 ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 2.33% ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้ในการทดลอง และความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ไม่เกิน 5% จึงสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีได้

การศึกษาสัดส่วนของตัวดูดซับของแข็งในสี องค์ประกอบในผงสีประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จะช่วยในเรื่องของความขาว แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และอะลูมิเนียมซิลิเกต (Al_2SiO_3) จะช่วยในเรื่องของการเพิ่มเนื้อสี และงานวิจัยนี้ได้เพิ่มส่วนของตัวดูดซับของแข็งเข้าไป ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นของแก๊ส 30 – 40 %RH ความดันบรรยากาศ อัตราการไหลของแก๊ส 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า สีทั่วไปที่ไม่มีการผสมสารดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับสีที่ผสมสารดูดซับ และเมื่อเติมปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะถูกจำกัดด้วยองค์ประกอบของสารบางชนิดในสี เช่น สารที่ทำให้เกิดความเงา จากการทดสอบสีที่ผสมสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นอกจากจะขึ้นกับปริมาณของสารดูดซับแล้ว ยังขึ้นกับสารที่ทำให้เกิดความเงาอีกด้วย กล่าวคือสีที่ผสมสารให้ความเงามากกว่าจะมีค่าความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า เนื่องจากสารที่ทำให้เกิดความเงานี้ จะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของสีหลังทาเคลือบบนกระดาษ ให้มีลักษณะลื่นและบดบังผิวหน้าของสารดูดซับ ทำให้แก๊สเข้าถึงตัวดูดซับได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของสีกึ่งเงายังไม่สามารถสรุปความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ชัดเจน เนื่องจากสีกึ่งเงาบางสัดส่วนของสารดูดซับเสียสภาพตั้งแต่อ่อนเริ่มทา ซึ่งเป็นไปได้ว่าสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลกระทบต่อเชิงเคมีกับองค์ประกอบบางชนิดในสีทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีชนิดกึ่งเงาจึงต่ำสุด โดยความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เรียงตามชนิดสีได้ ดังนี้ สีด้าน > สีเงา > สีกึ่งเงา นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าสีทั่วไปและไม่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ สีที่ปรับปรุงนี้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ขณะที่สีที่ผสมสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม

การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีที่มีการปรับปรุงสมรรถนะแล้วจะใช้สีที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทดสอบที่ภาวะต่าง ๆ โดยจะศึกษาตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส ความชื้นและอุณหภูมิของแก๊ส ในส่วนของตัวแปรอัตราการไหล พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีเพิ่มมากขึ้นในช่วงแรก โดยในงานวิจัยนี้อัตราการไหลที่ 400 มิลลิลิตรต่อนาที

จะให้ค่าการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงสุด และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไปที่ 600 มิลลิลิตร ต่อนาที พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการสัมผัสกันของแก๊สและสารดูดซับลดลง ในส่วนของตัวแปรความชื้นของแก๊ส ในงานวิจัยนี้จะปรับความชื้นแบบแก๊สไหลผ่านน้ำและไม่ผ่านน้ำ โดยจะกำหนดความชื้นแบบไหลผ่านน้ำอยู่ที่ 40 – 50 %RH ขณะที่แบบไม่ผ่านน้ำจะมีความชื้นอยู่ที่ 10 – 20 %RH จากการทดลองพบว่า ที่ภาวะแก๊สชื้น จะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าเมื่อภาวะแก๊สแห้ง เนื่องจาก ละอองน้ำจะ ช่วยในการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นไอออนก่อนเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และสำหรับตัวแปรอุณหภูมิ จะดำเนินการทดลองที่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสัลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสี่ของงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองอาฟราไม จากการทดสอบแบบจำลองพบว่า แบบจำลองอาฟราไมมีความเหมาะสมมากที่สุดในการอธิบายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ของสี่ที่ผสมสารดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนกระดาศจำลองเมื่อเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี่ทอากาศของแบบจำลอง 3 มิติ พบว่า ช่วงเวลาในการจำลอง 0 - 21 วินาที จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 13.58 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อกรัมของสี่ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากห้องปฏิบัติการ คือ 13.43 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี่ ในส่วนผลของอุณหภูมิมบนกระดาศจำลองจะพบว่า อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองจะอยู่ในช่วง 44 - 49 องศาเซลเซียส และกระดาศแต่ละชั้นจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน เนื่องจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาแต่ละชั้นขึ้นกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบริเวณนั้น และขึ้นกับพฤติกรรมการไหลของแก๊สในระบบด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นในการศึกษาสรีรวิทยาที่ผสมผสานดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในอีกหลายส่วน ในส่วนของการทดลองในห้องปฏิบัติการ เช่น การศึกษาผลกระทบของสารดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ในสีเพิ่มเติม การศึกษาสารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ในสี การศึกษาปฏิกิริยาการคายซัลเฟอร์เพื่อให้ครบวงจร การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสีต่อระยะเวลาในการใช้ซ้ำ การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ และการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ให้สามารถทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น หรือสามารถทดสอบที่อุณหภูมิต่ำลงได้ เป็นต้น ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองนี้ยังมีข้อจำกัดในหลายส่วน เช่น การใช้สารเพียงสามชนิดเป็นตัวแทนของสี หรือ การกำหนดเงื่อนไขในการหยุดการเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือ ความละเอียดในการคำนวณเซลล์แต่ละชั้นกระดาษ เป็นต้น อีกทั้งยังไม่สามารถวัดอุณหภูมิของกระดาษในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบผลได้ ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้ อาจจะไม่สมจริงเท่าที่ควร เนื่องจากอาจมีตัวแปรอื่นที่ส่งผลกระทบได้ ดังนั้นหากมีการพัฒนาแบบจำลองต่อไปควรพิจารณาในส่วนนี้เพิ่มเติม เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสีที่ภาวะอื่น ๆ ได้

ภาคผนวก

1. การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของสี สามารถคิดได้จากข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ทั้งขาเข้าและขาออกและหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบกับกระดาษเปลาที่เวลาและอัตราการไหลเท่ากัน โดยใช้สมการ ก.1 แสดงตัวอย่างการคำนวณที่ภาวะดังตารางที่ ก.1 และข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ ก.2 สำหรับทดสอบกระดาษเปลา และตารางที่ ก.3 สำหรับทดสอบกระดาษที่มีการเคลือบสี

$$q = \frac{P_T M_{wCO_2} F}{RT m_{paint}} \int_0^t (\%CO_2(in) - \%CO_2(out)) dt \quad \text{ก.1}$$

| | | |
|-------|---------------|--|
| เมื่อ | q | คือ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสี (มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อกรัมของสีทาอาคาร) |
| | M_{wCO_2} | คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิโมล) |
| | P_T | คือ ความดันรวมทั้งระบบ (บาร์) |
| | F | คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที) |
| | $\%CO_2(in)$ | คือ ร้อยละของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าโดยปริมาตร (-) |
| | $\%CO_2(out)$ | คือ ร้อยละของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกโดยปริมาตร (-) |
| | t | คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) |
| | R | คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (มิลลิลิตร.บาร์ ต่อ มิลลิโมล.เคลวิน) |
| | T | คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (เคลวิน) |
| | m_{paint} | คือ มวลของสีทาอาคาร (กรัม) |

ตาราง ก.1 ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

| พารามิเตอร์ | ค่า | หน่วย |
|------------------------------|---------|----------------------------------|
| มวลของสี | 100 | กรัม |
| อัตราการไหลของแก๊สโดยปริมาตร | 400 | มิลลิลิตรต่อนาที |
| อุณหภูมิ | 30 | องศาเซลเซียส |
| ค่าคงที่ของแก๊ส | 0.08314 | มิลลิลิตร.บาร์ต่อมิลลิโมล.เคลวิน |
| ความดัน | 1 | บาร์ |
| ช่วงเวลาที่ใช้ | 160 | นาที |

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลดิบจากการทดลองที่ภาวะอัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที
ของกระดาษที่ไม่มีการเคลือบสี

| เวลา (นาที) | %CO ₂ -ขาเข้า | %CO ₂ -ขาออก |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 5.9680 | 0.0330 |
| 1 | 5.9605 | 0.0707 |
| 2 | 5.9522 | 0.4002 |
| 3 | 5.9482 | 1.0358 |
| 4 | 5.9385 | 1.7377 |
| 5 | 5.9428 | 2.3755 |
| 156 | 5.9808 | 5.8962 |
| 157 | 5.9762 | 5.8965 |
| 158 | 5.9762 | 5.8960 |
| 159 | 5.9763 | 5.8955 |
| 160 | 5.9777 | 5.8955 |
| ผลรวม x ผลต่างของเวลา | 954.14 | 899.46 |

น้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ที่คลาดเคลื่อนไป

$$= 1 \times 44 \times 400 / (0.08314 \times 303) \times ((954.41 - 899.46) / 100)$$

$$= 381.79 \text{ มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลดิบจากการทดลองที่ภาวะอัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที
ของกระดาศที่มีการเคลือบสี

| เวลา (นาที) | %CO ₂ -ขาเข้า | %CO ₂ -ขาออก |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 5.9030 | 0.0080 |
| 1 | 5.8973 | 0.0140 |
| 2 | 5.8953 | 0.0308 |
| 3 | 5.9002 | 0.0560 |
| 4 | 5.9133 | 0.1042 |
| 5 | 5.9213 | 0.1787 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 156 | 5.9930 | 5.7697 |
| 157 | 5.9933 | 5.7710 |
| 158 | 5.9933 | 5.7710 |
| 159 | 5.9913 | 5.7702 |
| 160 | 5.9927 | 5.7703 |
| ผลรวม x ผลต่างของเวลา | 956.21 | 763.86 |

น้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ที่หายไป

$$= 1 \times 44 \times 400 / (0.08314 \times 303) \times ((956.21 - 763.86) / 100)$$

$$= 1,343.16 \text{ มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

น้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้ ต่อ น้ำหนักของสี

$$= (1,343.16 - 381.79) / 100$$

$$= 9.61 \text{ มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของสี}$$

2. การคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในการคิดจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จะคิดเทียบกับน้ำหนักของสารดูดซับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 10.5% โดยน้ำหนัก และแสดงตัวอย่างการคำนวณที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$\text{จากสมการ} \quad \ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที⁻¹)

q_t คือ ค่าความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

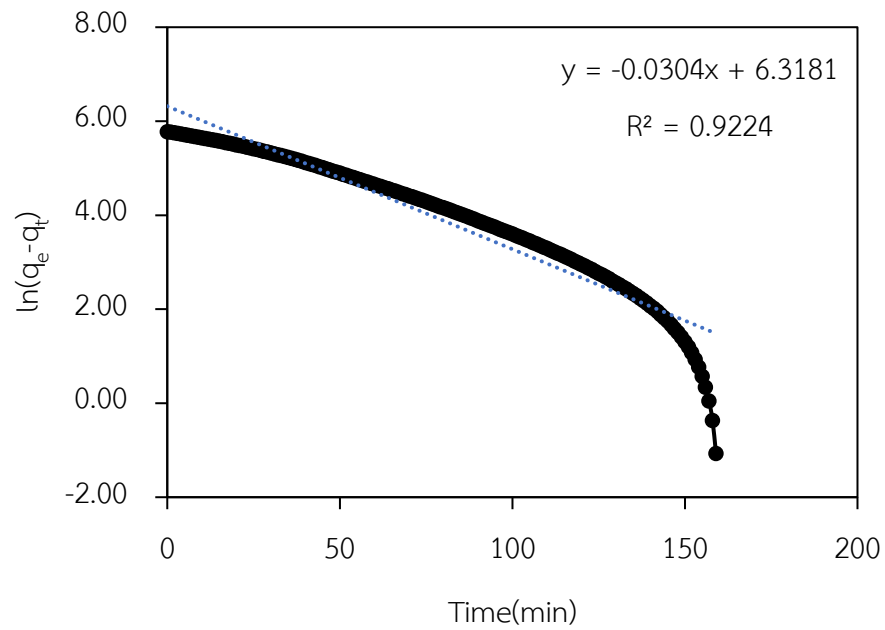
q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

| เวลา (นาที) | $\ln(q_e - q_t)$ | เวลา (นาที) | $\ln(q_e - q_t)$ |
|-------------|------------------|-------------|------------------|
| 0 | 5.78 | . | . |
| 1 | 5.77 | . | . |
| 2 | 5.75 | . | . |
| 3 | 5.74 | 156 | 0.34 |
| 4 | 5.73 | 157 | 0.05 |
| 5 | 5.72 | 158 | -0.37 |
| . | . | 159 | -1.07 |
| . | . | 160 | - |

จากตาราง ก.4 นำมาสร้างกราฟ โดยที่แกน x เป็นเวลา (นาที) และ แกน y เป็น $\ln(q_e - q_t)$ แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

ซึ่งจากรูปที่ ก.1 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = \ln q_e = 6.3184$$

$$\text{ความชัน} = k_1 = -0.0304$$

$$R^2 = 0.9224$$

จากนั้นหาค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ($q_{t,model}$) ได้จาก

$$q_{t,model} = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

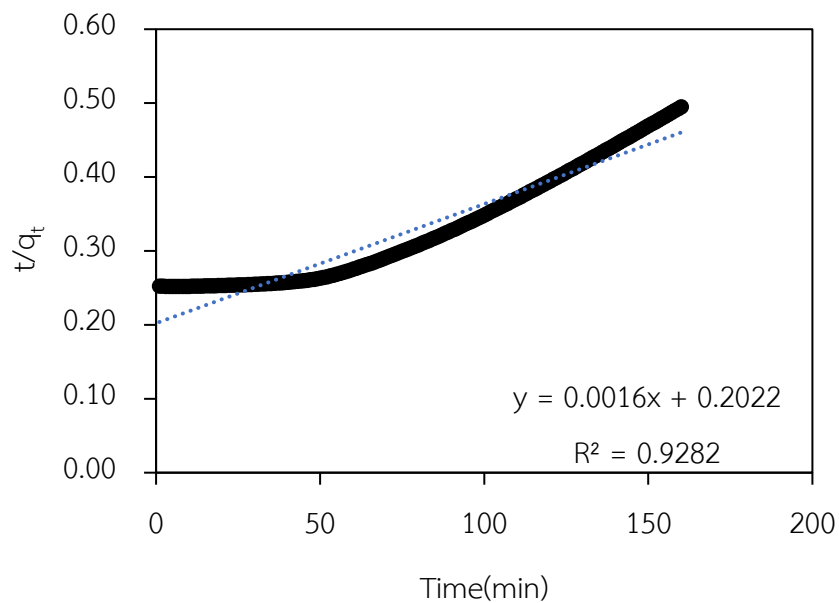
$$\text{จากสมการ } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที่⁻¹)

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

| เวลา (นาที่) | t/q _t | เวลา (นาที่) | t/q _t |
|--------------|------------------|--------------|------------------|
| 0 | - | . | . |
| 1 | 0.25 | . | . |
| 2 | 0.25 | . | . |
| 3 | 0.25 | 149 | 0.47 |
| 4 | 0.25 | 150 | 0.47 |
| 5 | 0.25 | 151 | 0.47 |
| 6 | 0.25 | 152 | 0.47 |
| 7 | 0.25 | 153 | 0.48 |
| 8 | 0.25 | 154 | 0.48 |
| 9 | 0.25 | 155 | 0.48 |
| 10 | 0.25 | 156 | 0.48 |
| 11 | 0.25 | 157 | 0.49 |
| . | . | 158 | 0.49 |
| . | . | 159 | 0.49 |
| . | . | 160 | 0.49 |

จากตาราง ก.5 นำมาสร้างกราฟ โดยที่แกน x เป็นเวลา (นาที่) และ แกน y เป็น t/q_t แสดง
ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ซึ่งจากรูปที่ ก.2 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{1}{q_e^2 k_2} = 0.2022$$

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{q_e} = 0.0016$$

$$R^2 = 0.9282$$

จากนั้นหาค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ($q_{t,model}$) ได้จาก

$$q_{t,model} = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$$

- แบบจำลองอาฟรามี

$$\text{จากสมการ } \ln\left(\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right)\right) = n_{av} \ln t + n_{av} \ln k_{av}$$

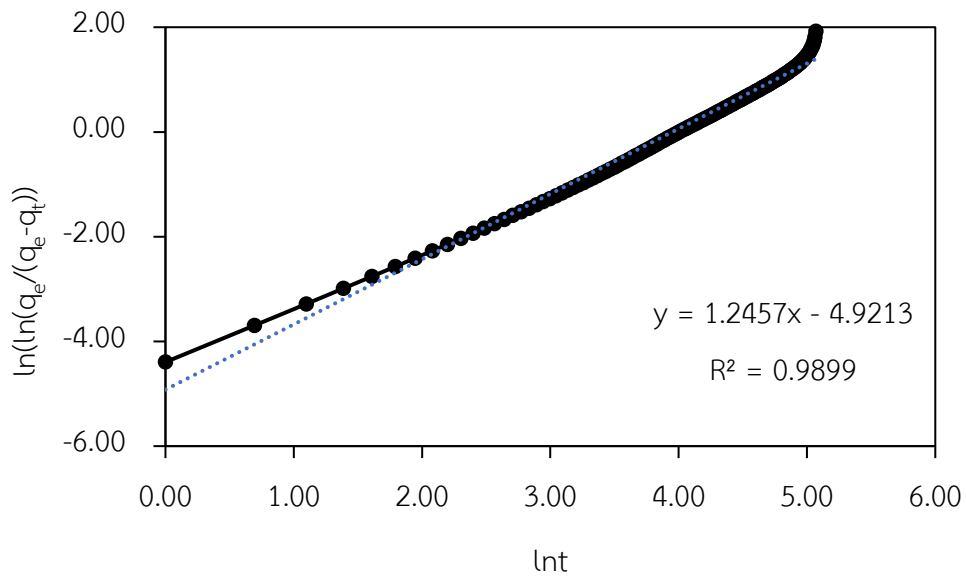
เมื่อ k_{av} คือ ค่าคงที่ของอาฟรามี (นาที่⁻¹)

n_{av} คือ เลขชี้กำลังของเวลาที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองอาฟรามี

| เวลา (นาที่) | ln t | ln(ln(q _e /(q _e -q _t))) | เวลา (นาที่) | ln t | ln(ln(q _e /(q _e -q _t))) |
|--------------|------|---|--------------|------|---|
| 0 | - | - | . | . | . |
| 1 | 0.00 | -4.40 | . | . | . |
| 2 | 0.69 | -3.70 | . | . | . |
| 3 | 1.10 | -3.28 | 149 | 5.00 | 1.47 |
| 4 | 1.39 | -2.99 | 150 | 5.01 | 1.50 |
| 5 | 1.61 | -2.76 | 151 | 5.02 | 1.52 |
| 6 | 1.79 | -2.57 | 152 | 5.02 | 1.55 |
| 7 | 1.95 | -2.41 | 153 | 5.03 | 1.58 |
| 8 | 2.08 | -2.27 | 154 | 5.04 | 1.61 |
| 9 | 2.20 | -2.15 | 155 | 5.04 | 1.65 |
| 10 | 2.30 | -2.03 | 156 | 5.05 | 1.69 |
| 11 | 2.40 | -1.93 | 157 | 5.06 | 1.75 |
| . | . | . | 158 | 5.06 | 1.82 |
| . | . | . | 159 | 5.07 | 1.92 |
| . | . | . | 160 | 5.08 | - |

จากตาราง ก.6 นำมาสร้างกราฟ โดยที่แกน x เป็น ln t และ แกน y เป็น ln(ln(q_e/(q_e-q_t)))
แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอาฟรามี

ซึ่งจากรูปที่ ก.3 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = n_{av} \ln k_{av} = -4.9213$$

$$\text{ความชัน} = n_{av} = 1.2457$$

$$R^2 = 0.9899$$

จากนั้นหาค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ($q_{t,model}$) ได้จาก

$$q_{t,model} = q_e(1 - \exp(-(k_{av}t)^{n_{av}}))$$

บรรณานุกรม

1. Spezzano, P., Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution. *Science of the Total Environment*, 2021. **754**: p. 142345.
2. Rogelj, J., et al., Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. *Nature*, 2016. **534**(7609): p. 631-639.
3. Scientists, U.o.C. The 20 countries that emitted the most carbon dioxide in 2018. 2020; Available from: <https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>.
4. BLOKHIN, A. The 5 Countries That Produce the Most Carbon Dioxide (CO₂). 2020; Available from: <https://www.investopedia.com/articles/investing/092915/5-countries-produce-most-carbon-dioxide-co2.asp#citation-2>.
5. Agency, I.E. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2020. 2021; Available from: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.
6. Colenbrander, S., et al. Five expert views on China's pledge to become carbon neutral by 2060. 2021; Available from: <https://odi.org/en/insights/five-expert-views-on-chinas-pledge-to-become-carbon-neutral-by-2060/>.
7. WIRES, N. G7 leaders to back new 'Nature Compact' to halve carbon emissions by 2030. 2021; Available from: <https://www.france24.com/en/europe/20210613-g7-leaders-to-back-new-nature-compact-to-halve-carbon-emissions-by-2030>.
8. Samanta, A., et al., Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012. **51**(4): p. 1438-1463.
9. Boonprasop, S., B. Chalermssinsuwan, and P. Piumsomboon, Effect of the operating parameters on the CO₂ capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) using conventional heat regeneration. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017. **78**: p. 282-289.
10. Smart paint makes buildings carbon. *New Scientist*, 2010. **205**(2742): p. 7.

11. Energy, J. Canada and U.S. unveil oxy-combustion carbon capture demonstration project to generate low emissions power. 2016; Available from: <https://www.jwnenergy.com/article/2016/10/19/canada-and-us-unveil-oxy-combustion-carbon-capture/>.
12. Wang, T. and G.J. Stiegel, Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies. 2016: Woodhead Publishing.
13. Gelles, T., et al., Recent advances in development of amine functionalized adsorbents for CO₂ capture. *Adsorption*, 2020. **26**(1): p. 5-50.
14. Zbair, M. and S. Bennici, Survey Summary on Salts Hydrates and Composites Used in Thermochemical Sorption Heat Storage: A Review. *Energies*, 2021. **14**(11): p. 3105.
15. Schöny, G., et al., Pilot scale demonstration of solid sorbent CO₂ capture technology at a biomass power station. 2018.
16. เปมิกา รักชาวงค์ and ฟามีชา มะรอเซ๊ะ, การกำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพ. 2556, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
17. คทาวุธ ภาชนะ. เอกสารประกอบการสอน วิชา 303432 เคมีพื้นผิว. 2554; Available from: http://sc.buu.ac.th/~chemistry/nchem60/handout/ebook_303432.pdf.
18. Musin, E., *Adsorption Modelling*. 2013.
19. Sahoo, T.R. and B. Prelot, Chapter 7 - Adsorption processes for the removal of contaminants from wastewater: the perspective role of nanomaterials and nanotechnology, in *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*, B. Bonelli, et al., Editors. 2020, Elsevier. p. 161-222.
20. Liu, Q., et al., Kinetics Studies of CO₂ Adsorption/Desorption on Amine-Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. **53**(29): p. 11677-11683.
21. เอกชัย แสนเมือง. *Paint Knowledge*. 2015; Available from: <https://sites.google.com/site/captaints2015/paint-knowledge-1>.
22. Yourself, C. สีทาภายใน. Available from: <https://th.construct-yourself.com/building-materials-and-constructions/coating-materials/paint-for-interior-work.html>.

23. Kate. How To Stain Wood: 10 Easy DIY Ways. 2016; Available from: <https://www.shelterness.com/how-to-stain-wood/>.
24. Wattanaphob. Painted black on the steel bar. Available from: <https://www.crushpixel.com/stock-photo/painted-black-on-steel-bar-2674241.html>.
25. Melissa Ellis. สีหน้ากับสีรองพื้นต่างกันอย่างไร. 2020; Available from: <https://noimoa.com/สีทับหน้ากับสีรองพื้น>.
26. Precision Engineering. ประเภทของสีทาบ้าน. 2019; Available from: <https://www.woodtect.com/blog/2019/01/color003>.
27. Compound, I. Inorganic Picment Compounds-The Chemistry of Paint. 2014 [cited 2021 June 17]; Available from: <https://www.compoundchem.com/2014/03/21/inorganic-pigment-compounds-the-chemistry-of-paint/>.
28. ลีจากภัย, ธ., เกร็ดน่ารู้ก่อนเลือกสีทาบ้าน, in Polymer Science MTEC. 2547. p. 26 - 29.
29. Nopco, S. Industry.02 Paint and Coating. 2015 [cited 2021 June 17].
30. Travis, J. and J. Kring, LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun. Third edition. ed. 2007: Prentice Hall.
31. Instruments, N. LabView Front Panel Explained. 2020 [cited 2021 June 21]; Available from: <https://www.ni.com/en-th/support/documentation/supplemental/08/labview-front-panel-explained.html>.
32. กิจไพบูลย์ ช., LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม. 2554: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
33. Anderson, J.D. and J. Wendt, Computational fluid dynamics. Vol. 206. 1995: Springer.
34. Versteeg, H. and W. Malalasekera, Computational fluid dynamics. The finite volume method, 1995: p. 1-26.
35. Guo, Y., et al., CO₂ sorption and reaction kinetic performance of K₂CO₃/AC in low temperature and CO₂ concentration. Chemical Engineering Journal, 2015. **260**: p. 596-604.

36. Rodríguez-Mosqueda, R., et al., Parametrical study on CO₂ capture from ambient air using hydrated K₂CO₃ supported on an activated carbon honeycomb. *Industrial & engineering chemistry research*, 2018. **57**(10): p. 3628-3638.
37. Rodríguez-Mosqueda, R., E.A. Bramer, and G. Brem, CO₂ capture from ambient air using hydrated Na₂CO₃ supported on activated carbon honeycombs with application to CO₂ enrichment in greenhouses. *Chemical engineering science*, 2018. **189**: p. 114-122.
38. Dheilly, R., et al., Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)₂. *Construction and building materials*, 2002. **16**(3): p. 155-161.
39. Shih, S.-M., et al., Kinetics of the reaction of Ca(OH)₂ with CO₂ at low temperature. *Industrial & engineering chemistry research*, 1999. **38**(4): p. 1316-1322.
40. Ridha, F.N., et al., CO₂ capture at ambient temperature in a fixed bed with CaO-based sorbents. *Applied energy*, 2015. **140**: p. 297-303.
41. Rebecca Lindsey. *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. ClimateWatch 2020 [cited 2021 June 24]; Available from: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.
42. ThaiPBSNews. ลักษณะลมประเภทต่าง ๆ ตามหลักพยากรณ์อากาศ. 2556 [cited 2563 พฤษภาคม 20]; Available from: <https://news.thaipbs.or.th/content/175725>.
43. กรมอุตุนิยมวิทยา. ฤดูกาลของประเทศไทย. 2558 [cited 2563 พฤษภาคม 20]; Available from: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=53>.
44. 2511, พ.พ.ศ., มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบสี วาร์นิช และวัสดุที่เกี่ยวข้อง เสถียรภาพต่อการเก็บ มอก. 285 เล่ม 12-2560. 2561.
45. ILAC, Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity-ILAC-G8:09. 2019.
46. Tenno, T., et al., Modeling Closed Equilibrium Systems of H₂O–Dissolved CO₂–Solid CaCO₃. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2017. **121**(16): p. 3094-3100.
47. Tenno, T., et al., Modelling equilibrium distribution of carbonaceous ions and molecules in a heterogeneous system of CaCO₃–water–gas. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2016. **65**: p. 68.

48. Kapica-Kozar, J., et al., Adsorption of carbon dioxide on TEPA-modified TiO₂/titanate composite nanorods. *New Journal of Chemistry*, 2017. **41**(16): p. 7870-7885.
49. Drunka, R., J. Grabis, and A. Krumina, Microwave Assisted Synthesis, Modification With Platinum And Photocatalytical Properties of TiO₂ Nanofibers. *Materials Science*, 2016. **22**.
50. Yang, J.-H., et al., Preparation of high surface area CaCO₃ for SO₂ removal by absorption of CO₂ in aqueous suspensions of Ca(OH)₂. *Powder technology*, 2010. **202**(1-3): p. 101-110.
51. Kosmulski, M., *Surface charging and points of zero charge*. Vol. 145. 2009: CRC press.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | วรัญญา ชันติอุดม |
| วัน เดือน ปี เกิด | 20 พฤศจิกายน 2539 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพมหานคร |
| วุฒิการศึกษา | วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 33 ซ.เพชรเกษม 65 ถ.เพชรเกษม แขวงหลักสอง เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160 |
| ผลงานตีพิมพ์ | Proceeding: Computational Fluid Dynamic Simulation of CO2 Capture Performance on Reactor Wall Surface, TIChE 2021 |

