

อิทธิพลของตำแหน่งฉีดอนุภาค CaCO_3 และ Bluff body ต่อ residence time ของกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Effect of CaCO_3 Particle Injection Location and Bluff body on residence time of Sulfur Dioxide Absorption

นิตินัย ปัญญาสุขกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จารุวัตร เจริญสุข

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยคือศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งฉีดอนุภาค CaCO_3 และ Bluff body ต่อ residence time ของกระบวนการดูดซับ SO_2 ในเตาเผาถ่านหิน โดยเตาเผามีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร และ สูง 3.0 เมตร จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของการฉีด CaCO_3 มีผลต่อ residence time ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ SO_2 ที่ลดลง โดยอัตราจลนศาสตร์ระหว่าง CaO และ SO_2 จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ residence time ของอนุภาคในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณการดูดซับ SO_2 เพิ่มขึ้น ขณะที่ Bluff body มีผลต่ออากาศพลศาสตร์ในบริเวณการไหลวนด้านนอก ซึ่งทำให้ residence time เพิ่มขึ้น

Abstract

The main objective of this research is to investigate the effects of CaCO_3 particle injection location and bluff body on the particle residence time during the process of sulfur dioxide absorption in coal combustion chamber. The coal combustion chamber has cylindrical shape with the inside diameter of 0.6 m and the height of 3 m. It was found that the injection location of CaCO_3 particle affects the residence time. This result relates to the reduction of SO_2 , whereby kinetic

rate between CaO and SO_2 increases with an increase in temperature. Moreover an increase in the residence time of the particle in high temperature zone will lead to an increase in amount of SO_2 absorption. The bluff body that affects the aerodynamic in the external recirculation zone leading to an increases in residence time.

1. บทนำ

การปลดปล่อยของ SO_2 จากการเผาไหม้ของถ่านหินที่มีกำมะถันสูงในเตาเผา เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดฝนกรด ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ พืช และสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ อย่างไรก็ตามระบบกำจัด SO_2 ในก๊าซไอเสียมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการติดตั้งเข้ากับเตาเผา จากปัญหาดังกล่าวนักวิจัยจึงให้ความสนใจในการพัฒนาเทคโนโลยีในการควบคุม SO_2 ที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ ดังเช่นการฉีดหินปูนผงเข้าไปในเตาเผาโดยตรง แต่สามารถดูดซับ SO_2 ได้เพียง 50 % [7] เนื่องจาก residence time ของอนุภาคที่อยู่ในเตาเผาสั้น การเพิ่ม residence time ของอนุภาค ซึ่งก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ SO_2 จึงเป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่ที่น่าสนใจ โดยในปัจจุบันได้มีการรวมเอากลไกการเกิดและการสลายตัวของ SO_2 เข้าไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ถ่านหินผงเพื่อทำนายการดูดซับ SO_2 ขณะเดียวกันได้มีการพัฒนาให้มี

ความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งในการติดตั้งหินปูน และ Bluff body ต่อ residence time ของกระบวนการดูดซับ SO_2

2. สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของก๊าซ [6]

สมการการไหลของก๊าซในรูปพิกัดทรงกระบอก โดยพิจารณาเป็นแบบสมมาตรคือ

2.1.1 สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u}) = \bar{S}_m \quad (1)$$

$\bar{S}_m$ คือ Source term ของถ่ายเทมวลของอนุภาคและก๊าซ

2.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ทิศทางการแนวรัศมี (ทิศ r) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{v}) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \right) + \bar{S}_v + \bar{S}_{m,v} \end{aligned} \quad (2)$$

ทิศทางการแนวแกน (ทิศ z) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{u}) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) + \bar{S}_u + \bar{S}_{m,u} \end{aligned} \quad (3)$$

ทิศทางการเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม (ทิศ θ) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{w}) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right) + \bar{S}_w + \bar{S}_{m,w} \end{aligned} \quad (4)$$

$\bar{S}_{(u,v,w)}$ คือพจน์ของความหนืด, $\bar{S}_{m(u,v,w)}$ คือการถ่ายโอนโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมโดยอนุภาคของแข็ง

2.1.3 สมการการถ่ายเทความร้อน

Turbulent kinetic energy:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{k}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{k}) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial z} \right) + G + \bar{\rho} \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

Dissipation rate:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{\epsilon}) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial z} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G + C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

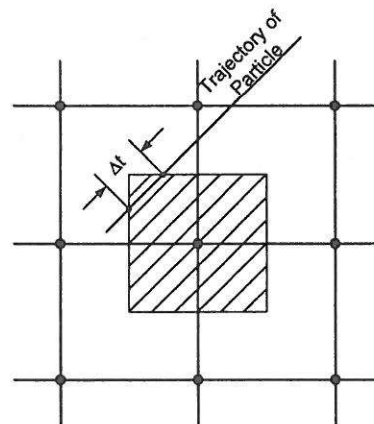
2.1.4 การเคลื่อนย้ายของสเกลลาร์

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \tilde{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u} \tilde{\phi}) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right) + \bar{S}_\phi \end{aligned} \quad (7)$$

ϕ คือ ปริมาณสเกลลาร์ที่พิจารณาในแต่ละปัญหา เช่น อุณหภูมิ, พลังงาน, ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่พิจารณา

2.2 แบบจำลองของอนุภาค [6]

การกระจายตัวของอนุภาคใช้วิธี Lagrangian โดยสมมติว่าอนุภาคเป็นทรงกลมและความหนาแน่นที่ทางเข้าคงที่ โดยอัตราการถ่ายเทมวล, โมเมนตัม, และพลังงานของอนุภาคและก๊าซเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ซึ่งเป็น Source term ของการคำนวณ สามารถหาได้โดย Particle Source In Cell Techniques [9] ซึ่งคือการอินทิเกรตอัตราการถ่ายเทดังกล่าวในช่วงเวลา Δt รูป (1) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเพื่อหาคำตอบสำหรับแต่ละตำแหน่งทางเข้าและแต่ละกลุ่มของขนาดอนุภาค



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยวิธี Lagrangian

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

การถ่ายเทมวลจากอนุภาคสู่ก๊าซสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dm_p}{dt} = R_m \quad (8)$$

กรณีการเผาไหม้ถ่านหิน R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่ก๊าซ โดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือสารในระหว่างการเผาไหม้

กรณีกระบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ R_m ถูกแทนด้วยการถ่ายเทมวลเข้าและออกจากของ

อนุภาคแคลเซียมด้วยการปลดปล่อย CO_2 ในขบวนการ Calcination และดูดซับ SO_2 และ O_2 ในขบวนการ Sulfation โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 3

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและการเคลื่อนที่เฉลี่ย

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (9)$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากแรงดูดที่กระทำต่ออนุภาค โดยความเร็วในการกระจายของอนุภาคสมมติว่าสัมพันธ์กับความเร็วของก๊าซที่แกว่งไปมา (Lockwood, 1980) ดังนั้นสมการสมดุลโมเมนตัมในรูปพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{u}_p \pm u_{disp} - \tilde{u}_g) \quad (10)$$

$$\frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{v}_p \pm v_{disp} - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{w}^2}{r_p} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{18\mu C_d \text{Re}_p}{24\rho_p d_p^2} \quad (12)$$

$\tilde{u}_g, \tilde{u}_p$ คือความเร็วเฉลี่ยของก๊าซและอนุภาคตามลำดับ u_{disp}, v_{disp} คือความเร็วของก๊าซที่แกว่งไปมาตามแนวแกนและแนวรัศมีตามลำดับ μ คือความหนืด C_d คือสัมประสิทธิ์แรงดูด Re_p คือ Reynolds number ของอนุภาค d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค r_p คือระยะจากแกนสมมาตรของอนุภาค

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมดุลพลังงานภายในอนุภาคคือผลรวมของการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคและความร้อนที่เกิดขึ้นหรือใช้ไประหว่างการทำปฏิกิริยา ความร้อนที่ปล่อยออกมาพร้อมกับการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ของชาร์และความร้อนจากการระเหยในระหว่างกระบวนการปล่อยสารระเหย ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

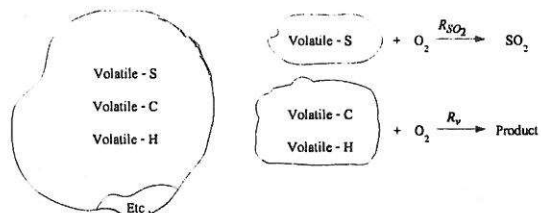
$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (13)$$

$$\text{ซึ่ง } \dot{Q}_t = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{comb} \quad (14)$$

m_p มวลของอนุภาค $\dot{Q}$ อัตราการถ่ายเทความร้อน L_v คือความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซของถ่านหิน (kJ/kmol) c_p คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K) T_p คืออุณหภูมิ (K)

2.3 แบบจำลองของออกไซด์ของกำมะถัน [2]

ถ่านหินเมื่อถูกทำให้ร้อนจะปลดปล่อยสารระเหย โดยส่วนที่เหลือในรูปของแข็งและขี้เถ้า สารระเหยที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบจะเผาไหม้โดยรวมตัวกับอากาศ จะก่อให้เกิดออกไซด์ของกำมะถันและก๊าซอื่นๆ จากปฏิกิริยาในรูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้สมมุติฐานว่ากำมะถันในสารระเหยรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด การเผาไหม้ถ่านหินภายในห้องเผาไหม้ที่สารตั้งต้นไม่ได้ผสมกันมาก่อนเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า 1000 °C อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงจลนพลศาสตร์จะสูงกว่าอัตราการผสมกันของสารตั้งต้น [10] ดังนั้นปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการผลิตของกำมะถันที่ประกอบอยู่ในสารระเหยได้



รูปที่ 2 การเกิดออกไซด์ของกำมะถันของการเผาไหม้สารระเหย

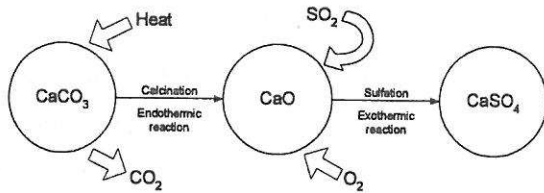
อัตราการก่อตัวของ SO_2 นิยามได้ดังนี้คือ

$$R_{\text{SO}_2} = x_s \cdot R_v \quad (15)$$

x_s คือสัดส่วนโดยมวลของกำมะถัน, R_v คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหย

2.4 แบบจำลองของกระบวนการดูดซับ [3], [11]

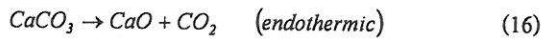
กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยา Heterogeneous ซึ่งสารตั้งต้นมีสถานะต่างกันหรือสภาวะต่างกัน ซึ่งคือปฏิกิริยาระหว่าง $\text{SO}_2(\text{g})$ และหินปูน หรือ $\text{CaCO}_3(\text{s})$ โดยทั่ว ๆ ไปจะสมมุติว่ามีกลไกที่เกี่ยวข้องสองขั้นตอนต่อเนื่องกัน ขั้นตอนแรกคือ calcination, นั่นคือการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต ในขั้นตอนที่สองคือ sulfation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่าง $\text{SO}_2(\text{g})$ และ $\text{CaO}(\text{s})$ โดยแนวคิดถูกแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 Overall concepts for absorption

2.4.1.แบบจำลองของกระบวนการ Calcination [4]

ปฏิกิริยาการสลายตัวของ CaCO_3 คือ



รูปที่ 4 อธิบายแนวคิดของแบบจำลอง Calcination

ในรูปแบบของแกนที่กำลังหดตัวสำหรับอนุภาคทรงกลม

สมการของกระบวนการ Calcination คือ

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{M}{\rho} R_D \quad (17)$$

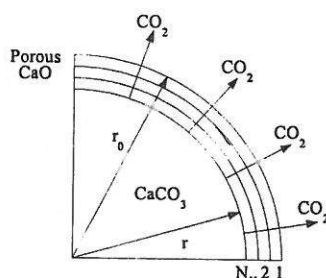
$$\text{ที่ } t=0, \quad r = r_0 \quad (18)$$

$$R_D = k_D (P_e - P) \quad (19)$$

$$k_D = 0.00122 \exp(-4026/T) \quad (20)$$

$$p_e = \exp(17.74 - 0.00108T + 0.332 \ln T - 22020/T) \quad (21)$$

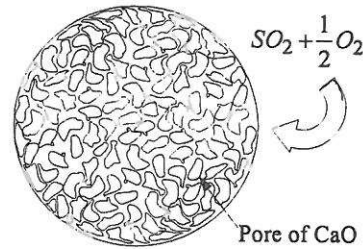
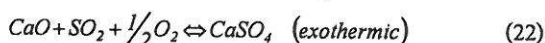
r คือรัศมีของแกน CaCO_3 ที่หดตัว (m) t คือเวลา (s) M คือน้ำหนักโมลของ CaCO_3 (kg) ρ คือความหนาแน่นของ CaCO_3 (kg/m^3) R_D คืออัตราการสลายตัว r_0 คือรัศมีเริ่มต้นของอนุภาคสมมติให้มีค่าคงที่ k_D คือค่าคงที่ของอัตราของ CaCO_3 ($\text{kmole m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{atm}^{-1}$) P_e คือสมมูลความดันในการแยกตัวของ CO_2 (atm) P คือ partial pressure ของ CO_2 ที่ผิวระหว่าง CaO กับ CaCO_3 และ T เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)



รูปที่ 4 Schematic Diagram ของ Calcination Model

2.4.2 แบบจำลองของกระบวนการ Sulfation [3], [8], [11]

ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง CaO และ SO_2 คือ



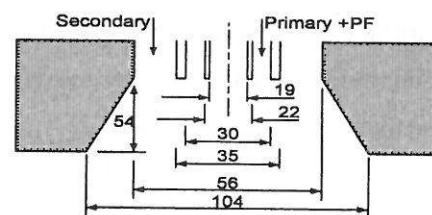
รูปที่ 5 แบบจำลองกระบวนการ sulfation ในอนุภาค CaO อัตราการเกิดปฏิกิริยานิยามได้ดังนี้คือ

$$r = \frac{I}{w} \frac{dn'}{dt} = r_0 e^{-\beta \frac{n'}{w}} e^{(-E/RT) + (E/RT_{ref})} \frac{C^m}{C_{ref}^m} \quad (23)$$

r_0 คืออัตราของปฏิกิริยาในสถานะเริ่มต้น, w คือน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียม (g), β เป็นตัวแปรที่ได้จากการทดลอง, n' คือปริมาณของซัลเฟตในอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุน (g), E คือพลังงานกระตุ้น (cal/g), R คือค่าคงที่สากลของก๊าซ, T_{ref} คืออุณหภูมิอ้างอิง (1143 K) และ C_{ref} คือความเข้มข้นของ SO_2 ($2.9 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$), m คืออันดับของปฏิกิริยา โดยแบบจำลองได้มีการปรับปรุงให้แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิให้มีความแม่นยำขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้

3. ลักษณะห้องเผาไหม้ [6]

เตาเผามีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร และ สูง 3.0 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผา 0.056 เมตร รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของหัวเผา Single Annular orifice รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างโปรแกรมหลักที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี Finite Volume Method ร่วมกับ (k - E model)

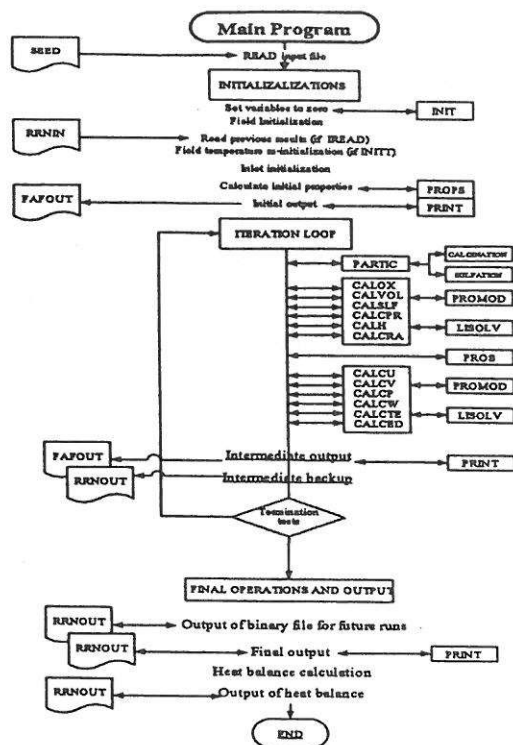


รูปที่ 6 โครงสร้างของหัวเผาในห้องเผาไหม้

โครงสร้างโปรแกรม

SEED	Input file เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
INIT	ค่าเริ่มต้นของตัวแปร
PROPS	คำนวณความหนืดของของไหล
PARTIC	คำนวณการกระจายตัวของอนุภาค

CALOX	คำนวณการกระจายตัวของออกซิเจน
CALVOL	คำนวณการกระจายตัวของสารระเหย
CALSULF	คำนวณการกระจายตัวของ SO ₂
CALCPR	คำนวณการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์
CALCH	คำนวณเอนทัลปีภายในห้องเผาไหม้
CALCRA	คำนวณการแผ่รังสี
CALCU	คำนวณความเร็วทิศทางแนวแกน
CALCV	คำนวณความเร็วทิศทางแนวรัศมี
CALCP	คำนวณความดัน
CALCW	คำนวณความเร็วทิศทางแนวเส้นสัมผัส
CALCTE	คำนวณพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
CALCED	คำนวณการสลายตัวของความปั่นป่วน
PROMOD	ทำหน้าที่แก้ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็ว ความดัน เอนทัลปี ออกซิเจน ก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ฯลฯ
LISOLV	ทำหน้าที่แก้สมการ โดยวิธี Tri-diagonal Matrix Algorithm
PRINT	Output file จากการคำนวณ

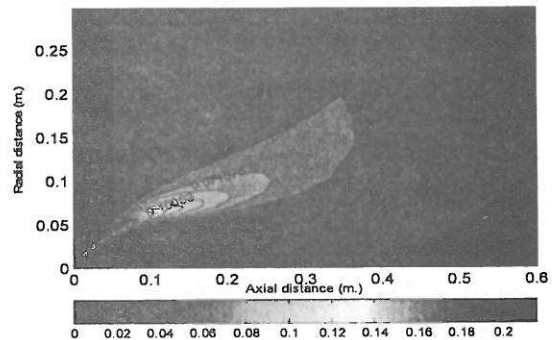


รูปที่ 7 โครงสร้างโปรแกรม

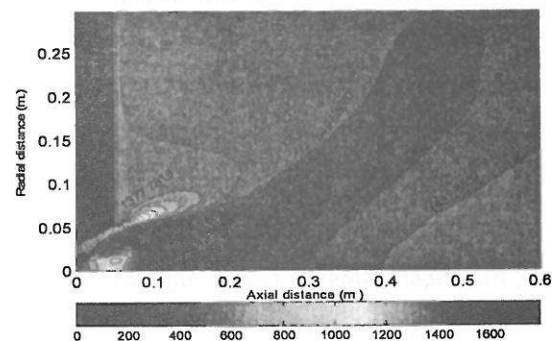
4. ผลการจำลองเชิงคำนวณและการวิเคราะห์

4.1 การจำลองการเผาไหม้ด้านหิน (base case)

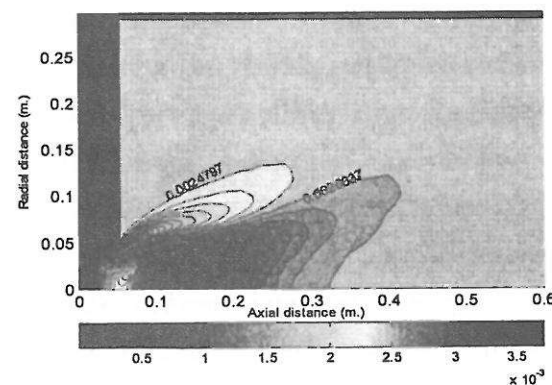
หัวข้อนี้เป็นการจำลองการเผาไหม้ด้านหินก่อนการฉีด CaCO₃ จากรูปที่ 8, 9 และ 10 กำมะถันในสารระเหยเมื่อเผาไหม้ได้รวมตัวกับ O₂ เกิดเป็น SO₂ ความเข้มข้นของ SO₂ จะสูงสุดในช่วง 0.05-0.18 เมตร ความเข้มข้นของ O₂ จะสูงสุดในช่วง 0.08-0.2 เมตร และอุณหภูมิจะสูงที่สุดในช่วง 0.08-0.18 เมตร จากทางออกหัวเผา ซึ่งพบว่า SO₂, O₂ และอุณหภูมิจะสัมพันธ์กัน เนื่องจากด้านหินปลดปล่อยสารระเหยและเกิดการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว



รูปที่ 8 การกระจายตัวของความเข้มข้นของ O₂



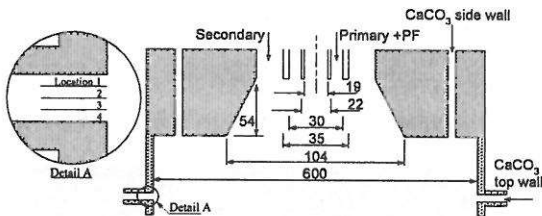
รูปที่ 9 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (K)



รูปที่ 10 การกระจายตัวของความเข้มข้นของ SO₂

4.2 การจำลองเชิงคำนวณของตำแหน่งฉีด CaCO_3 และ Bluff body ต่อ residence time ของการดูดซับ SO_2

แบบจำลองการดูดซับ SO_2 ที่ปรับปรุงแล้วถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งฉีดและ Bluff body ต่อ residence time ของการดูดซับ รูปที่ 9 แสดงถึงตำแหน่งทางเข้าของอนุภาค CaCO_3 ขนาด 0.0096 cm โดยตำแหน่งทางเข้าแต่ละด้านถูกแบ่งย่อยออกเป็นสี่ location

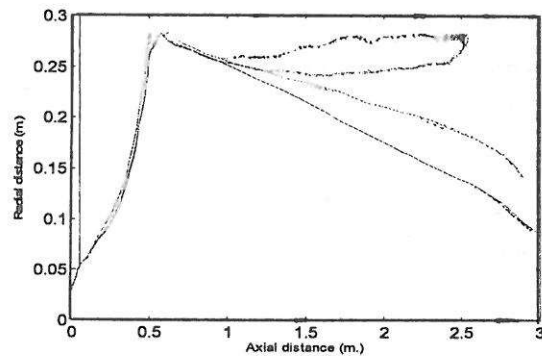


รูปที่ 11 โครงสร้างของหัวเผาและทางเข้าของ CaCO_3

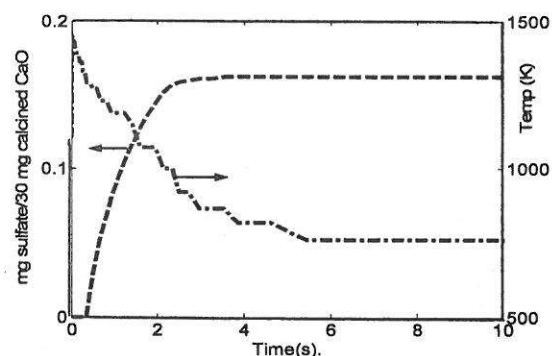
จากรูปที่ 12 และ 13 อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตถูกพ่นเข้าที่ด้านข้างที่ระยะตามแนวรัศมี 0.054 เมตร อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีความเข้มข้นของ SO_2 สูง โดย residence time เฉลี่ยของ location 1 และ 2 อยู่ที่ 4.22 วินาที หลังจากนั้นจะหลุดออกจากห้องเผาไหม้ ส่วน location 3 และ 4 มี residence time เท่ากับเวลาสูงสุดที่กำหนดไว้ในแบบจำลองที่ 120 วินาที จากรูปที่ 13 ช่วงเวลาประมาณ 0.5 วินาที แรกหลังจากพ่นอนุภาค CaCO_3 เข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ CaCO_3 ไปเป็น CaO และเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 1300 K จากการศึกษาของ G.H. Newton [5] พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 K ปฏิกิริยาจะไม่เสถียรและไม่เกิดปฏิกิริยา จากนั้น CaO จะเริ่มทำปฏิกิริยากับ SO_2 จนถึงเวลาประมาณ 4 วินาที โดยบริเวณที่อนุภาคทำปฏิกิริยาจะอยู่ที่ระยะตามแนวแกนประมาณ 1.0-2.0 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 1300 K จากนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ามาก โดยปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับได้เฉลี่ยอยู่ที่ $0.16 \text{ mg}/30 \text{ mg CaO}$ ซึ่ง residence time เฉลี่ยที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 3 วินาที

จากรูปที่ 14 และ 15 อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตถูกพ่นที่ด้านข้างในบริเวณกระแสการไหลวนด้านนอก (ERZ) ที่ระยะตามแนวรัศมี 0.201 เมตร โดยอนุภาคมี residence

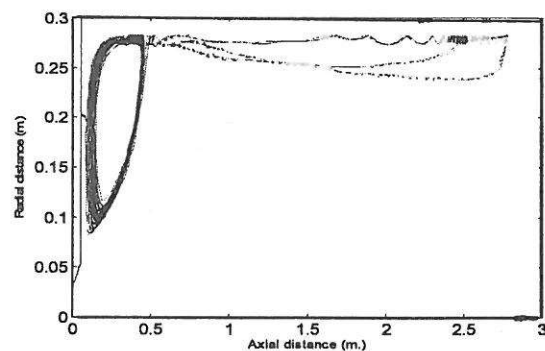
time เฉลี่ยใน ERZ ได้นานถึง 15 วินาที ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นอนุภาคจะหลุดออกจาก ERZ และจะเคลื่อนตัวไปยัง down stream ซึ่งสามารถทำให้อนุภาคมี residence time สูงถึง 120 วินาที แต่เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไม่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยา โดยปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับได้เฉลี่ยอยู่ที่ $0.13 \text{ mg}/30 \text{ mg CaO}$ ขณะที่ residence time เฉลี่ยที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 3.85 วินาที



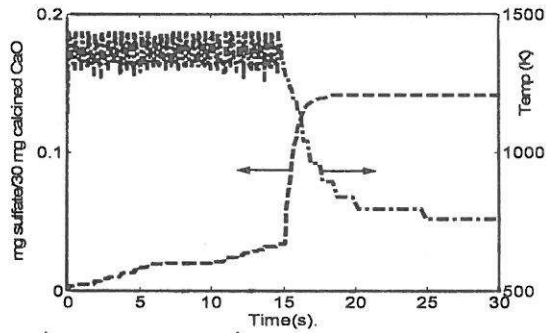
รูปที่ 12 เส้นทางเดินของอนุภาค พ่นที่ด้านข้าง radial = 0.054 m



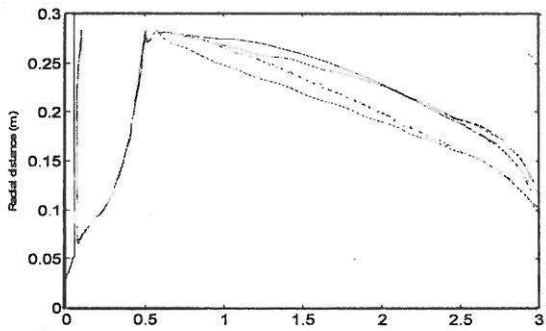
รูปที่ 13 ปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับ และ อุณหภูมิของอนุภาค CaCO_3 เทียบกับเวลา พ่นที่ด้านข้าง, radial=0.054 m



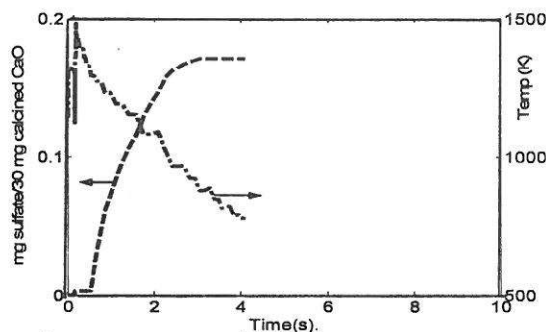
รูปที่ 14 เส้นทางเดินของอนุภาค พ่นที่ด้านข้าง radial = 0.201 m



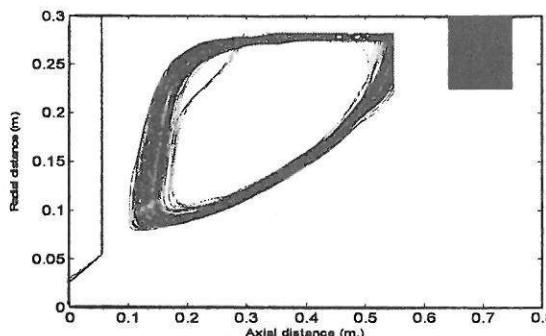
รูปที่ 15 ปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับ และ อุณหภูมิของอนุภาค CaCO_3 เทียบกับเวลา พื้นที่ด้านข้าง, radial=0.201 m



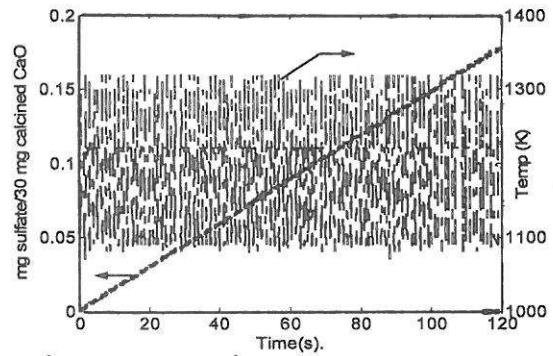
รูปที่ 16 เส้นทางเดินของอนุภาค พื้นที่ด้านบน, axial=0.099 m



รูปที่ 17 ปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับ และ อุณหภูมิของอนุภาค CaCO_3 เทียบกับเวลา พื้นที่ด้านบน, axial=0.099 m



รูปที่ 18 เส้นทางเดินของอนุภาค พื้นที่ด้านบน, axial=0.304 m และ Bluff body



รูปที่ 19 ปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับ และ อุณหภูมิของ CaCO_3 เทียบกับเวลา พื้นที่ด้านบน, axial=0.304 m และ Bluff body

จากรูปที่ 16 และ 17 อนุภาคถูกพื้นที่ด้านบนที่ระยะตามแนวแกนเท่ากับ 0.099 เมตร ในบริเวณ ERZ โดยอนุภาคมี residence time เล็กน้อยในห้วงเผาไหม้เท่ากับ 4.56 วินาที จากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยัง down stream แล้วหลุดออกจากห้องเผาไหม้ โดยปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับได้เฉลี่ยอยู่ที่ $0.157 \text{ mg}/30 \text{ mg CaO}$ ขณะที่ residence time เล็กน้อยที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 3.7 วินาที

การพ่นอนุภาค CaCO_3 ที่ด้านข้างและด้านบนตำแหน่งต่าง ๆ กัน พบว่าไม่สามารถควบคุมให้อนุภาคมี residence time เพิ่มขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมได้ ซึ่งจากการศึกษาของ G.H. Newton [5] ได้แนะนำว่าอัตราเจือปนระหว่าง CaO และ SO_2 จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงแต่ไม่เกิน 1300 K ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้าง Bluff body เพื่อให้สามารถควบคุมอนุภาคให้มี residence time ที่นานขึ้นในบริเวณที่ต้องการได้ ในขณะที่เดียวกันอิทธิพลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใต้เงื่อนไขผนังเป็นฉนวนทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้ ๆ หัวเผาจะสูงเกิน 1300 K ดังนั้นจึงได้ทำการลดอุณหภูมิของผนังด้านบนลง ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้หัวเผาในบริเวณ ERZ มีอุณหภูมิประมาณ 1000 K

จากรูปที่ 18 และ 19 อนุภาคเคลื่อนที่คาร์บอนที่ถูกพ่นทางด้านบนในบริเวณ ERZ ที่ระยะตามแนวแกน 0.304 เมตร ภายใต้เงื่อนไขการลดอุณหภูมิของผนัง ขณะนี้ Bluff body ถูกสร้างที่ระยะตามแนวแกน 0.64-0.75 เมตร ที่ระยะตามแนวรัศมี 0.225-0.3 เมตร หลังจากพ่นอนุภาค CaCO_3

ทำให้อนุภาคไหลวนอยู่ใน ERZ โดย residence time ที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับเวลาสูงสุดที่กำหนดไว้ในแบบจำลองที่ 120 วินาที ขณะที่ปริมาณ SO_2 ที่ดูดซับได้เฉลี่ยอยู่ที่ $0.183 \text{ mg} / 30 \text{ mg CaO}$

จากตารางที่ 1 ซึ่งแสดงถึงระดับการลดลงของการแพร่ของ SO_2 หลังจากที่พัก $CaCO_3$ พบว่าการพ่นอนุภาค $CaCO_3$ ที่อัตราการป้อนของอนุภาค $CaCO_3$ ต่าง ๆ กัน ที่ด้านข้างและด้านบนใกล้เคียงและไกลจากหัวเผา เปรียบเทียบการลดลงของ SO_2 ไม่แตกต่างกันมาก ส่วนกรณีการสร้าง Bluff body ร่วมกับการลดอุณหภูมิผนัง ที่ตำแหน่งการป้อน $CaCO_3$ ที่ด้านบนไกลจากหัวเผา การลดลงของ SO_2 แตกต่างจากกรณีที่ผ่านมาอย่างชัดเจน โดยที่อัตราการป้อน 0.01 kg/s เปรียบเทียบการลดลงของ SO_2 สามารถลดลงได้ถึง 74 % ขณะที่อัตราการป้อน $CaCO_3$ เท่ากับ 0.15 kg/s สังเกตได้ว่าเปรียบเทียบการลดลงของ SO_2 ภายใต้เงื่อนไข Bluff Body และตำแหน่งฉีดต่าง ๆ กัน ผลที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากความเข้มข้นของ SO_2 ภายในห้องเผาไหม้ลดลงเมื่อมีการป้อนอนุภาค $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือปริมาณการดูดซับได้สูงสุดเข้าใกล้ปริมาณการก่อตัวของก๊าซซัลเฟอร์ภายในห้องเผาไหม้ โดยระดับการแพร่ของ SO_2 สามารถลดลงได้ประมาณ 91-94 %

ตารางที่ 1 ระดับการลดลงของการแพร่ของ SO_2

ตำแหน่งทางเข้าของอนุภาค $CaCO_3$	อัตราการป้อนของ อนุภาค $CaCO_3$ (kg/s)		
	0.01	0.05	0.15
	% reduction		
ด้านข้าง ใกล้หัวเผา	32.3	78.9	94.2
ด้านข้าง ไกลหัวเผา	31.5	77.8	91
ด้านบน ใกล้หัวเผา	32.3	78.8	93.1
ด้านบน ไกลหัวเผา bluff body	74.1	88.6	93.3

5. สรุป

จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของการพ่น $CaCO_3$ มีผลต่อ residence time ของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ SO_2 ที่ลดลง โดยอัตราจลนศาสตร์ระหว่าง CaO และ SO_2 จะมีค่าสูงขึ้นในบริเวณที่เหมาะสมโดยปริมาณการดูดซับ

SO_2 เพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมี residence time นานขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงแต่ไม่เกิน 1300 K ในขณะที่การสร้าง Bluff body มีผลต่ออากาศพลศาสตร์ภายใน ERZ ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค $CaCO_3$ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้มี residence time เพิ่มขึ้นในบริเวณอุณหภูมิสูงได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาค $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] จารุวัตร เจริญสุข และ นิพนธ์ ปัญญ์นุสยกุล, "การจำลองผลของตำแหน่งฉีดต่อเส้นทางเดินอนุภาคในขบวนการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์," วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 3, หน้า 109-114, กันยายน 2543.
- [2] จารุวัตร เจริญสุข และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดออกไซด์ของกำมะถันจากการเผาไหม้ของถ่านหินผง," วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, หน้า 24-29, มิถุนายน 2542.
- [3] จารุวัตร เจริญสุข และ วิภู ศรีสืบสาย, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์," สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 13 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, หน้า 1-8, 2542.
- [4] D.S. Geoffrey, C.K. John and W.P. David, "A Mathematical Model for the flash Calcination of Dispersed $CaCO_3$ and $Ca(OH)_2$ Particles," Ind.Eng. Chem. Res., Vol.28, No.2., pp.155-160, 1989.
- [5] G.H. Newton, S.L. Chen and J.C. Kramlich, "Role of Porosity Loss in Limiting SO_2 Capture by Calcium Based Sorbents," AIChE J. VOL.35, NO.6., pp.988-994, 1989.
- [6] J. Charoensuk, "The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors," Ph.D Thesis, University of London, 1996.

- [7] K. Tetsuo, "Flue Gas Desulfurization Technology,"
Clean Coal Technology Seminar in Thailand, pp.
26-36, 1999.
- [8] R.H. Borgwardt, "Kinetics of the Reaction of SO₂
with Calcined Limestone," AIChE J. Vol.4, No.1.,
pp.59-64, 1970.
- [9] S.M.A. Rizvi "Prediction of Flow, Combustion and
Heat Transfer in Pulverized Coal Flames." Ph.D.
Thesis of University of London and the Diphoma of
Membership of the Imperial College. 1985.
- [10] T. Abbas "In-flame Measurement of N-Pollutant
and Burnout in a Pulverised-Coal-Fired Furnace.",
Ph.D. Thesis of University of London and the
Diphoma of Membership of the Imperial College.
1993.
- [11] W. Sriseubsai, "Mathematical Model for the
Adsorption of Sulfur Dioxide by Calcium
Carbonate," Master Thesis King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang, 2000.

Nomenclature

D_{eff}	Laminar and Effective diffusion coefficients of scalar property
G	Generation of turbulent kinetic energy
p	ความดัน
r	พิกัดตามแนวรัศมี
u	ความเร็วตามแนวแกน
v	ความเร็วตามแนวรัศมี
z	พิกัดตามแนวแกน
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
ε	อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน
ρ	ความหนาแน่นของก๊าซ
μ_{eff}	Effective viscosity