

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์

### Mathematical Model for Sulfur Dioxide ( SO<sub>2</sub> ) Absorption by Calcine ( CaO ) Particle

จาวุฒิ เจริญสุข, วิชา ศรีสืบสาย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร66(2)326-9053, E-Mail: kswipoo@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นรายงานการศึกษาและกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ผลการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถูกแสดงเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทั้งยังแสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่อการดูดซับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สำหรับเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหาจะใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบออยเลอร์ โดยเปรียบเทียบการอัตราการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับเวลา

#### Abstract

This paper concerns about a formulation of the semi-empirical mathematical model for sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) absorption by Calcine (CaO) particle, dissociated from Calcium Carbonate. Euler's method is utilized for the time-domain solution of the absorption level. The model is able to predict the effect of particle size on SO<sub>2</sub> absorption level. Eventually, the numerical results are in good agreement with the experimental data

#### 1.บทนำ

การพัฒนาทางด้านคอมพิวเตอร์นำไปสู่การสร้างวิธีการหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข เช่น การหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล การเผาไหม้ และการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับกระบวนการในการศึกษาห้องเผาไหม้อุตสาหกรรม คำตอบที่ถูกคำนวณมาจะได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิศวกรหรือนักวิจัยเห็นประเด็นความแตกต่างระหว่างข้อสมมติทางทฤษฎี และสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังต้องการปรับปรุงเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นไป เพื่อให้การคำนวณ

ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ และมีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน ถ่านหินถูกใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงานเรื่อยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แต่มันก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ในหลายปีที่ผ่านมาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาระบบการเผาไหม้ถ่านหิน (Magnussen et al., 1976; Salooja, 1979; Lockwood et al., 1984; Sloan et al., 1986; Romo - Millares, 1992; Lockwood et al., 1993; and Shen., 1994) และเมื่อไม่นานมานี้ผลงานของ Millares (Millares., 1992) ได้รวมกลไกการเกิดและสลายตัวของไนโตรเจนออกไซด์ (De Soete, 1988) เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อนรวมถึงการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากการเผาไหม้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นผลผลิตอีกชนิดหนึ่งจากการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งทำให้เกิดการสุกร้อนของเตาเผา ถึงแม้จะได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยอนุภาคหินปูนขึ้นมาในอดีต แต่แบบจำลองก็มีความซับซ้อนและมีข้อจำกัดสูงไม่สามารถนำเข้มาพร้อมกับแบบจำลองของการเผาไหม้ได้ (Sotirchos and Yu 1985) จึงอาจเป็นเหตุผลว่า ก่อนหน้านี้ไม่มีผลงานที่รวมเอากลไกการเกิดและการสลายตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในการศึกษารุ่นนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายแต่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้เพื่อแสดงการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จากการศึกษาถึงอัตราการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (A.Levy and E.L. merryman., 1965) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในระดับเดียวกันกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในการเผาไหม้ของถ่านหินในห้องเผาไหม้ที่สารตั้งต้นไม่ได้ผสมกันมาก่อนนั้น เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงกว่า 1000 °C อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงกว่าอัตราการ

ผลหมักของสารตั้งต้นทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเมื่อผสมกัน ดังนั้นการผสมกันแบบปั่นป่วนจึงมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาทั้งหมด อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยมากจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำและเวลานานกว่าหลังการเผาไหม้ มีอยู่หลายวิธีที่จะลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เช่นวิธีการกำจัดถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำออกไปก่อนที่จะใส่เข้าไปในหีบเผาไหม้ การผสมด้วยถ่านหินที่มีคุณภาพสูง หรือการแยกองค์ประกอบของถ่านหินด้วยวิธีการล้างหรือวิธีแรงดึงดูดของโลก เป็นต้น มีการทดลองและประสบผลสำเร็จในการกำจัดเหล็กซัลไฟด์ (FeS<sub>2</sub>) (W.D. Holstead and E. Raask, 1969) แต่ยังไม่สามารถกำจัดพันธะทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของถ่านหินได้ ยังมีวิธีการที่สามารถลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ในระหว่างหรือหลังการเผาไหม้ เช่นการฉีดตัวดูดซับเข้าไปในเตาเผาในตำแหน่งที่ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีที่สุด ตัวดูดซับดังกล่าวที่รู้จักกันดี 2 ชนิดคือ แคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูน (CaCO<sub>3</sub>) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะมีวิธีการฉีดด้วยกัน 2 วิธีคือแบบแห้งและเปียกเพื่อให้ดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ก๊าซไอเสีย ซึ่งการเลือกใช้วิธีทั้ง 2 นี้ก็ขึ้นอยู่กับความต้องการหรืออุปกรณ์ที่ใช้ตามความเหมาะสมและงบประมาณ ในกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบแห้งจะมีราคาถูกที่สุดแต่การดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะต่ำโดยสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ได้เพียง 50 % (Tetsuo KAWAMURA, 1999) เนื่องจากเวลาที่อยู่ในเตาเผาสั้น ฉะนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำวิจัยเพื่อการพัฒนา

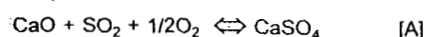
แคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูน (CaCO<sub>3</sub>) เมื่อใส่เข้าไปในอุณหภูมิสูงจะแตกตัวเป็นอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ที่มีรูพรุน (CaO) และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว จากนั้นจะจับตัวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO<sub>4</sub>) อัตราความร้อนที่สูงจากเตาเผาจะทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีพื้นที่จำเพาะสูงถึง 90 ตารางเมตรต่อกรัม (Borgwardt, R.H., 1985) ในการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการดูดซับของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) (Bruce et al., 1989) แต่ก็ยังใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน การศึกษาด้วยวิธีการทดลองอันหนึ่งของ Zarkanitis, S. และ Sotirchos S.V. ทำให้เห็นว่าอนุภาคจะมีช่องว่างสำหรับดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสิ่งนี้จะสัมพันธ์กับการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของอนุภาคและความสามารถในการส่งถ่ายมวลภายในอนุภาค ซึ่งสรุปไว้ว่าการกระจายตัวของขนาดและรูพรุนซึ่งติดต่อกันและกันเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับแคลเซียม มากกว่าปัจจัยในแง่ความพรุนของอนุภาค ผลของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อเวลาจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นในขณะที่อุณหภูมิการเกิดแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้นและอุณหภูมิการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ในรูปของการแพร่ที่ถูกจำกัดด้วยการดูดซับของรูพรุนที่ผิวด้านนอก การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในช่วง 750 – 850 °C

ซึ่งจะเป็นช่วงที่ดีที่สุดของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งอุณหภูมิจะต่ำกว่าบริเวณที่มีการเผาไหม้ (1000 °C)

โครงสร้างของรูพรุนนั้นจะเปลี่ยนไปเมื่อเกิดปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ Newton et al., 1989 กล่าวไว้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ก่อให้เกิดการลดลงของความพรุนของแคลเซียมออกไซด์เนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดผลึกในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 900 ถึง 1300 °C ในช่วงเวลาอันสั้น (< 1 วินาที) ระหว่างดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในกระบวนการนี้ (ประมาณ 970 °C) ผลึกเล็ก ๆ จำนวนมากในอนุภาคแคลเซียมออกไซด์จะรวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะมีจำนวนลดลง ซึ่งมีผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะและการลดลงของอัตราการดูดซับ ผลดังกล่าวเป็นไปในแนวเดียวกันกับผลของ Borgwardt และ Bruce ในปี 1986 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการเกิดแคลเซียมซัลเฟต (CaSO<sub>4</sub>) ในปี 1970 Borgwardt แสดงให้เห็นถึงการลดลงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการเพิ่มขึ้นของการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งสัมพันธ์กันแบบเอ็กโปเนนเชียล ในแบบจำลองเชิงการทดลองส่วนมากจะบรรยายถึงกระบวนการดูดซับของรูพรุนที่ผิวด้านนอกเนื่องจากการแพร่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผ่านรูของแคลเซียมออกไซด์ (Georgakis et al., 1979; Lee and Goergakis, 1981; Hartman and Couglin, 1974, 1976, 1978; Bhatia and Perlmutter, 1981; Christman and Edgar, 1983; Bardakci, 1984, Marsh and Uirichson, 1982 and Ramachandran and Smith, 1977.) หลังจากนั้น Simons, 1982; Simons and Garman, 1986 พบว่าการเกิดการดูดซับที่รูพรุนของอนุภาคจะลดปริมาณการแพร่ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดูดซับได้ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 900 °C ถึง 1300 °C เนื่องมาจากการแพร่และจลนพลศาสตร์เคมีของพันธะเคมีเกิดขึ้นน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 °C ในขณะที่จะเกิดความไม่เสถียรของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 °C (Cole et al., 1987; Newton, 1987) การศึกษาของ Sotirchos and Yu 1985 ได้พัฒนาแบบจำลองโครงสร้างของรูพรุนแบบสุ่มรวมเข้ากับแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเพื่อจะจำลองการเกิดปฏิกิริยาของของแข็งและก๊าซ ซึ่งได้จำลองการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 % โดยปริมาตรด้วยแคลเซียมที่อุณหภูมิ 850 °C และได้นำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Cole et al., 1987; Newton, 1987 เป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้มีการแนะนำไว้ในบทความของ Cole et al., 1987; Newton, 1987 ได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลองไว้ในรายงานนั้นเช่นกัน

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงได้ดังสมการสมดุลเคมีดังนี้



โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) (Borgwardt, R.H., 1970 ) คือ

$$r = \frac{1}{w} \frac{dn'}{dt} = \frac{\eta}{\rho} k_v c^m \quad [1]$$

ในหน่วยของกรัมโมลต่อกรัมของแคลเซียมออกไซด์ต่อวินาที และ w คือน้ำหนักของอนุภาค C และ m เป็นลำดับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และลำดับของปฏิกิริยา ตามลำดับ  $k_v$  เป็นอัตราคงที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ อธิบายด้วยสมการของ Arrhenius

$$k_v = A e^{-E/RT} \quad [2]$$

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานกระตุ้น, อัตราการเกิดปฏิกิริยาและ frequency factor ของหิน dolomite, Borgwardt, R.H., 1970.

Stones	Activation energy, E, cal./g. mole	Reaction rate constant, $K_v$ , sec. <sup>-1</sup>	Frequency factor, A, sec. <sup>-1</sup>
1337	10,000	$4.8 \times 10^3$	$2.4 \times 10^5$
1351	18,100	$7.2 \times 10^3$	$9.0 \times 10^6$
1343	14,200	$4.0 \times 10^3$	$1.1 \times 10^6$
1360	8,100	$2.3 \times 10^3$	$5.5 \times 10^4$

$\eta$  เป็นตัวแปรที่ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของอัตราการดูดซับเนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยตัวแปรนี้สัมพันธ์กับ  $\frac{n'}{w}$  ตามสมการ

$$\ln \eta \frac{Ac^m}{\rho} - \frac{E}{RT} = -\beta \frac{n'}{w} + \ln r_0 \quad [3]$$

$\beta$  เป็นตัวแปรที่ได้จากการทดลอง  $n'$  เป็นอนุภาคของซัลไฟต์ในหน่วยกรัมโมล  $r_0$  เป็นการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะเริ่มต้น (ไม่มีซัลเฟต) ดังสมการ

$$r_0 = \eta_0 \frac{A_0 c^m}{\rho_0} e^{-E/RT} \quad [4]$$

จากสมการ 3 และ 4 จะได้

$$A = \frac{\eta_0 \rho}{\eta \rho_0} A_0 e^{-\beta \frac{n'}{w}} \quad [5]$$

จากสมการที่ 2, 4 และ 5 จะได้

$$r = \frac{\eta \rho}{\rho \rho_0} r_0 \frac{\rho_0 e^{E/RT}}{\eta_0 c^m} \frac{\eta_0}{\eta} e^{-\beta \frac{n'}{w}} e^{-E/RT} c^m \quad [6]$$

$$\text{ดังนั้น } r = r_0 e^{-\beta \frac{n'}{w}} \quad [7]$$

สมการที่ 7 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันตัวแปรไม่กี่ตัวซึ่งไม่สัมพันธ์กับการสังเกตจากการทดลอง จากข้อมูลเมื่อมีปริมาณซัลเฟต  $1 \times 10^{-3}$  กรัมโมลต่อกรัม ผู้ศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่าง  $\ln(r)$  และส่วนกลับของอุณหภูมิ  $1/T$  ( $K^{-1}$ ) ดังนั้นสมการที่ 7 จะถูกเปลี่ยนเป็น

$$r = r_0 e^{-\beta \frac{n'}{w}} e^{\frac{-E}{RT} + c_0} \quad [8]$$

$$c_0 = \frac{E}{R T_{ref}} \quad [9]$$

โดยที่  $T_{ref}$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิงที่ 1143 K (870 °C) สมการข้างต้นจะเหมือนกับสมการที่ 7 เมื่ออุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิง นอกไปจากนี้การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับเพิ่มขึ้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะได้

$$r = r_0 e^{-\beta \frac{n'}{w}} e^{(-E/RT) + (E/R_{ref})} \frac{C^m}{C_{ref}^m} \quad [10]$$

เมื่อ  $C_{ref}$  เป็นความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์  $2.9 \times 10^{-8}$  กรัมโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า  $r_0$  ของแคลเซียมออกไซด์แต่ละชนิดได้มาจากการประมาณค่าแบบเชิงเส้นตรงของการเกิดปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต  $1 \times 10^{-3}$  กรัมโมลต่อกรัม เป็นไปตามสมการ

$$\ln r_0 = \ln r_{1 \times 10^{-3}} - \beta(1 \times 10^{-3}) \quad [11]$$

$\beta$  ได้มาจากการที่กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งรู้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่  $1 \times 10^{-3}$  และ  $2 \times 10^{-3}$  ซึ่งได้จากการทดลอง (Borgwardt, 1970) โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 2 และ 3

$$\beta = \frac{\ln r_{2 \times 10^{-3}} - \ln r_{1 \times 10^{-3}}}{2 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}} \quad [12]$$

ตารางที่ 2 ผลของอนุภาคกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาสภาวะ sulfate loading ที่  $2 \times 10^{-3}$  g mole/g, 870 °C.

Stones	Reaction rate, r (g mole/g sec) X 10 <sup>5</sup>		
	D <sub>p</sub> 0.0096 cm.	D <sub>p</sub> 0.025 cm.	D <sub>p</sub> 0.13 cm.
1337	4.2	3.2	1.4
1351	3.2	2.1	1.3
1343	2.1	1.4	0.7
1360	2.5	1.8	1.1

ตารางที่ 3 ค่าที่ได้จากการทดลองของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 870 °C สภาวะ sulfate loading ที่  $1 \times 10^{-3}$  g mole/g ของอนุภาคขนาด 0.0096 cm. (150/170-mesh particle size).

Stones	Reaction rate (g mole/g sec) X 10 <sup>5</sup>
1337	6.4
1351	5.9
1343	3.6
1360	3.1

จากความสัมพันธ์ข้างต้นตัวอย่างของกราฟสำหรับอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ 1337 แสดงไว้ดังรูปที่ 1 ค่าของ  $r_0$  และ  $\beta$  ของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์แต่ละชนิดได้มาในทำนองเดียวกัน โดยสรุปรวมไว้ในตารางที่ 4









