

เอกสารอ้างอิง

1. Akita, K., and F. Yoshida, "Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid Phase Mass Transfer Coefficients in Bubble Columns", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 13, 84 (1974)
2. Akita, K., and F. Yoshida, "Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 12, 76 (1973)
3. Alper. E., W. D. Deckwer, and P. V. Danckwerts, "Comparison of Effective Interfacial Areas with the Actual Contact Area for Gas Absorption in a Stirred Cell", Chem. Eng. Sci., 35, 1263 (1980)
4. Astarita, G., and R. A. Marshelkar, "Heat and Mass Transfer in Non-Newtonian Fluids", Chem. Eng., 317, 100 (1977)
5. Astarita, G., and D. W. Savage, "Gas Absorption and Desorption with Reversible Instantaneous Chemical Reaction", Chem. Eng. Sci., 35, 1755 (1980)
6. Bird, R. B., W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", Jhon Wiley Press, London (1960)
7. Calderbank, P. H., "Gas Absorption from Bubble," Chem. Eng., pp. CE 209-CE 233, October (1967)

8. Coulson, J.M., and J.F. Richardson, "Chemical Engineering"
Pergamon. Press., Vol 3, 80 (1971)
9. Danckwerts, P.V., and M.M. Sharma, "The Absorption of
Carbondioxide into Solutions of Alkalines and
Amines" , Chem. Engr., pp. CE 244, October (1966)
10. Danckwerts, P.V., and A.M. Kennedy, "The Kinetics of
Absorption of Carbondioxide into Neutral and
Alkaline Solution I" , Chem. Eng. Sci., 8, 201 (1958)
11. Danckwerts, P.V., A.M. Kennedy, and D. Roberts, "Kinetic
of Carbondioxide Absorption in Alkaline Solution
II" , Chem. Eng. Sci., 18, 63 (1963)
12. Danckwerts, P.V. "Gas-Liquid Reaction" , McGraw-Hill,
New York (1970)
13. Davies, R.M., and G. Taylor, G.I. Proc. R. Soc., A200, 375 (1950)
14. Deckwer, W.D., R. Burckhart, and G. Zoll, "Mixing and Mass
Transfer in Tall Bubble Columns" , Chem. Eng. Sci.,
29, 2177 (1974)
15. Deckwer, W.D., Y. Louisi, A. Zaidi, and M. Ralek,
"Hydrodynamic Propertys of the Fischer-Tropsch
Slurry Process" , Ind, Eng. Chem. Proc. Des. Dev.,
19, 1980

16. Deckwer, W.D., K.Nguyen-tien, A.Schumpe, and Y.Serpomen,
"Oxygen Mass Transfer into Aerated CMC Solutions
in a Bubble Column", Biotechn.Bioengng., accepted
(1981)
17. Govier, G.W., and K.Aziz, "The Flow of Complex Mixtures
in Pipes", Van Nostrand Reinhold, New York (1972)
18. Gestrich, W., and W. Kratss, "Specific Interfacial
Area Bubble Layers", 16(1), 10 (1976)
19. Harte, C.R., F.M.Baker, and H.H. Purcell, "Absorption
of Carbon dioxide in Sodium Carbonate-Bicarbonate
Solutions", Ind.Eng.Chem., 25, 528 (1933)
20. Hetroni, G., "Handbook of Multiphase System", Hemisphere
Publishing Corp., 2-15 (1982)
21. Hewitt, G.F., and D.N.Roberts, "A Studies of Two Phase
Flow Pattern by Simultaneous X-Ray and Flush
Photograph", Rept. AERE-M2159, UKAEA, Haswell,
(1969)
22. Hills, J.H., "The Operation of a Bubble Column at High
throughputs I. Gas Holdup Measurements",
Chem.Eng.J., 12, 89 (1976)
23. Hsu, K.H., L.E.Erickson and L.-T. Fan, "Oxygen Transfer
to Mixed Cultures in Tower System", Biotechn.
Bioengng., 17, 499 (1975)

24. Joosten, G.E.H., and P.V. Danckwerts, J. Chem. Engng. Data, 17, 452 (1972)
25. Kastanek, F., "The Volume Mass Transfer Coefficient in a Bubble Bed Column" , Coll. Czechoslov. Chem Commun., 42, 2491 (1977)
26. Lockett, M.J., and R.D. Kirtpatrick, " Ideal Bubbly Flows and Actual Flow in Bubble Columns " , Trans. Inst. Chem. Engrs, 53, 267 (1975)
27. Moo-Young, M. and T. Hirose, "Can J. Chem. Eng.", 50, 128, (1972)
28. Nakanoh, M., and F. Yoshida, "Gas Absorption by Newtonian and Non-Newtonian Liquids in a Bubble Column" , Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 19, 190 (1980)
29. Nishikawa, M., H. Kato, and K. Hashimoto, "Heat Transfer in Aerated Tower Filled with Non-Newtonian Liquid" , Ind. Eng. Chem. Prog. Des. Dev., 16, 133 (1977)
30. Pinsent, B.R.W., L. Pearson, and F.J.W. Roughton, "The Kinetics of Combination of CO_2 with OH^- " , Trans. Faraday Soc., 52, 1512 (1956)
31. Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and T.K. Sherwood, "The Property of Gases and Liquids", McGraw-Hill, 3ed (1977)

32. Roberts, D., and P.V. Danckwerts, "Kinetics of CO₂ Absorption in Alkaline Solution-I", Chem. Eng. Sci., 17, 961 (1962)
33. Roughton, F.J.W., and V.H. Booth, "Catalytic Effect of Buffers on the Reaction :
CO₂ + H₂O \rightleftharpoons H₂CO₃", Biochem. J., 32, 2040 (1938)
34. Shah, Y.T., B.G. Kelkar, S.P. Godbole and W.D. Deckwer, "Design Parameters Estimations for Bubble Column Reactors", AIChE J., 28, 3, 353 (1982)
35. Sharma, M. and P.V. Danckwerts, "Chemical Methods of Measuring Interfacial Area and Mass Transfer Coefficients in Two Fluid System", Brit. Chem. Eng., 15, 522 (1970)
36. Smith, J.M. "Gas Dispersion in Viscous Liquids with a Static Mixer", The Chem. Engr., 827, Nov. (1978)
37. Tasakorn, P., "Effect of Suspension Solids on Gas Liquid Contacting in an Agitated Tank", M.Sc. Thesis, Wales University, England, 1972
38. Uno, S., and R.C. Kintner, AIChE J., 2, 420 (1936)
39. Voigt, J., and K. Schugerl, "Absorption of Oxygen in Countercurrent Multistage Bubble Columns I. Aqueous Solution with Low Viscosity", Chem. Eng. Sci., 34, 1221 (1979)

40. Voigt, J., V. Hecht, K. Schugerl, "Absorption Of Oxygen in Countercurrent Multistage Bubble Columns II. Aqueous Solution with High Viscosity" , Chem. Eng. Sci., 35, 1317(1980)
41. Voyer, R.D., and A.I. Miller, "Improved Gas-Liquid Contacting in Cocurrent Flow" , Can. J. Chem. Eng., 46, 335(1968)
42. Wallis, G.B., "One-Dimensional Two Phase Flow" , McGraw-Hill, New York(1969)
43. Wang, K.B., and L.T. Fan, "Mass Transfer in Bubble Columns Packed with Motionless Mixers " , Chem. Eng. Sci., 33, 945(1978)
44. Yagi, H., and F. Yoshida, "Gas Absorption by Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Sparged Agitated Vessels" , Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 14, 4, 488(1975)
45. Schumpe, A., and W.D. Deckwer, "Analysis of Chemical Methods for Determination of Interfacial Areas in Gas-in-Liquid Dispersions with Nonuniform Bubble Sizes" , Chem. Eng. Sci., 35, 221(1980)

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

1. ความแรงของอิออน (ionic strength)

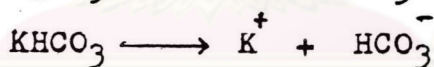
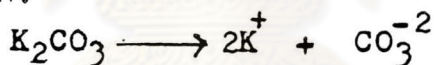
ความแรงของอิออน (ionic strength) ในสารละลายคำนวณได้จาก

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i z_i^2$$

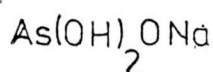
เมื่อ C_i คือความเข้มข้นของกิโลกรัมอิออนต่อสารละลายหนึ่งลูกบาศก์เมตร

z_i คือประจุของชนิดอิออน

สารพวกโปแตสเซียมคาร์บอเนต โปแตสเซียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต มีคุณสมบัติเป็น Strong Electrolyte ดังนั้นในสารละลายจึงอาจจึงแตกตัว



ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตที่ถูกไฮโดรไลส์ (hydrolysed) เป็น



ความแรงของอิออน (ionic strength) ของสารละลายที่มี

K_2CO_3 1.2 โมลาร์ $KHCO_3$ 0.5 โมลาร์ และ $NaAsO_2$ 0.34 โมลาร์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาค่าเป็นไปเพื่อให้อัตราส่วน

$$\frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 1$$

จึงคำนวณได้ดังนี้ ที่เงื่อนไข

$$\begin{aligned} [CO_3^{2-}] &= [HCO_3^-] \\ &= \frac{2(1.2) + 0.5}{3} \\ &= 0.966 \end{aligned}$$

กิโลกรัมอิออนต่อเมตร³

| ชนิดอิออน กิโลกรัมอิออน/ลบ.ม. | K_2CO_3 | $KHCO_3$ | $As(OH)_2ONa$ |
|----------------------------------|-----------|----------|---------------|
| K^+ | 1.933 | 0.966 | 0.34 |
| CO_3^{2-} | 0.966 | - | - |
| HCO_3^- | - | 0.966 | - |
| $As(OH)_2O^-$ | - | - | 0.34 |
| I | 2.899 | 0.966 | 0.34 |

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นความแรงของอิออนในสารละลาย} &= 2.899 + 0.966 + 0.34 \\ &= 4.205 \text{ กิโลกรัมอิออน / เมตร}^3 \end{aligned}$$

2. ความเข้มข้นสมดุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกละลาย

(Equilibrium Concentration of Dissolved Carbon Dioxide)

ภายใต้ความดันบรรยากาศน้อยๆ ความสามารถในการละลายของก๊าซ CO_2 ในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งหาได้โดยสมการ (Danckwerts และ Sharma, 1966)

$$\log H_w = \frac{1140}{T} - 5.30$$

ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

$$T = 273 + 29 = 302 \text{ องศาเซลวิน}$$

ดังนั้น $H_w = 2.98 \times 10^{-2}$ กิโลกรัมโมล/เมตร³ ที่ความดันบรรยากาศ
ความสามารถในการละลายของ CO_2 ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จริง
สามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$-\log(H/H_w) = K_s I$$

ซึ่งพบว่าความสามารถในการละลายของก๊าซในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่
เกิดปฏิกิริยาซึ่งมีประมาณ้อยละ 10 และ

$$K_S = i_+ + i_- + i_G$$

i_+ , i_- , i_G คือของ cation, anion และก๊าซตามลำดับ
ค่าของ i ที่ใช้กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอิออนต่างๆในระบบนี้

มีดังนี้ (Danckwerts และ Sharma , 1966)

| ชนิดของ ion | ม ³ /กิโลกรัมอิออน |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Na ⁺ | 0.094 |
| K ⁺ | 0.071 |
| CO ₃ ⁻² | 0.021 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.021 |
| CO ₂ | - 0.017 (25°C) |
| As(OH) ₂ O | 0.021 |

ดังนั้นเมื่อเป็น K_2CO_3 $K_S = 0.071 + 0.021 - 0.017$ กิโลกรัม
 $= 0.075$ ม³/กิโลกรัมอิออน

ดังนั้น K_S ของ $KHCO_3$ จึงมีค่าเท่ากับ 0.075 กว

และ K_S ของ $As(OH)_2ONa = 0.094 + 0.021 - 0.017$
 $= 0.098$ ม³/กิโลกรัมอิออน

ดังนั้น $\log(H/H_w) = (0.075)(2.899) + (0.075)(0.966) +$
 $(0.098)(0.34) = -0.323$
 $H = 1.416 \times 10^{-2}$ กิโลกรัมโมล/ม³

3. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกละลายในของเหลว

(Bulk Concentration of Dissolved Carbon Dioxide)

จากสมการ (73)

$$C_b = \frac{K_2 [HCO_3^-]^2}{K_1 [CO_3^{2-}]}$$

$$\log K_2 = \frac{-2902.4}{T} + 6.498 - 0.0238 T$$

$$\log K_1 = \frac{-3404.7}{T} + 14.843 - 0.03279 T$$

อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส T = 302 องศาเซลเซียส

$$K_2 = 5.009 \times 10^{-11}$$

$$K_1 = 4.64 \times 10^{-7}$$

คั้งนั้ที่เงื่อนไซ $\frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}$ = 1

$$C_b = \frac{5.009 \times 10^{-11}}{4.64 \times 10^{-7}} (0.966)$$

$$= 1.042 \times 10^{-4} \text{ กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

แรงขับหาโคโคยไซ $C^* = 1.416 \times 10^{-2} \times 0.10 \times 1 \text{ กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$

$$C^* - C_b = 1.312 \times 10^{-3} \text{ กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

4. การแตกตัวของตัวเร่งที่สมบูรณ์

(Completion of the Ionisation of Catalyst)

ถ้าสมมติว่าผลของความแรงอิออน (Ionic Strength) ของสารละลายที่มี K_2 และ $K_{As(OH)_3}$ เท่ากันแล้ว (Danckwerts และ Sharma, 1966)

$$\frac{[As(OH)_2O^-]}{[As(OH)_3]} \approx \frac{As(OH)_3 [CO_3^{2-}]}{K_2 [HCO_3^-]}$$

ซึ่ง $K_2 = 5.009 \times 10^{-11}$ ที่ 29 องศาเซลวิน

$$PK_{As(OH)_3} = 9.294 - \frac{\sqrt{I}}{1+3.0\sqrt{I}} + 0.055 I$$

($0 \leq I \leq 1.5$ กิโลกรัมอิออน/ลบ.ม)

$$PK_{As(OH)_3} = 9.614 - (1.48 \times 10^{-2})(29)$$

$$- \log K_{As(OH)_3} = 9.184$$

$$K_{As(OH)_3} = 6.534 \times 10^{-10} \text{ กิโลกรัมอิออน/ลบ.ม.}$$

เมื่ออัตราส่วนพีเออร์ เป็นหนึ่ง

$$\frac{[As(OH)_2O^-]}{[As(OH)_3]} = \frac{6.534 \times 10^{-10}}{5.009 \times 10^{-11}} = 13.044$$

ปริมาณของ $As(OH)_3$ น้อยมากเมื่อเทียบกับ $As(OH)_2O^-$ คั้งนั้การแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์จึงไม่มีผล

5. การคำนวณ Pseudo-First Order Rate Constant

Pseudo - First Order Rate Constant



$$= k_{As} [As(OH)_2O^-] + k_{OH^-} [OH^-] + k_{H_2O}$$

จากสมการ(70) และที่ 29 องศาเซลเซียส

$$\log k_{As} = 12.2 - \frac{2830}{302}$$

$$k_{As} = 674.744 \text{ ลบ.ม./กิโลกรัมไอออน.วินาที}$$

การแตกตัวของอาร์เซไนต์ไอออนในสารละลาย 0.34 โมลาร์ ดังนั้น

$$k_{As} [As(OH)_2O^-] = (674.744)(0.34) = 229.413 \text{ (วินาที)}^{-1}$$

ปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ จึงสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการ(54)และที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส

$$\log k_{H_2O} = 329.85 - 110.541 \text{ Log}302 - \frac{17265.4}{302}$$

$$k_{H_2O} = 0.034 \text{ (วินาที)}^{-1}$$

ซึ่งเป็นค่าน้อยมาก เมื่อมีการเติมตัวเร่ง ค่า k_{H_2O} จึงไม่จำเป็นต้องเอามาคำนวณ ดังนั้นสมการที่ (56)

$$\log k_{OH^-} = 13.635 - \frac{2895}{T}$$

$$= 13.635 - \frac{2895}{302}$$

$$k_{OH^-} = 11.191 \times 10^3 \text{ ลบ.ม./กิโลกรัมไอออน-วินาที}$$

$$[OH^-] = K_w [CO_3^{2-}] / K_2 [HCO_3^-]$$

จากภาคผนวกรูป ก.1 pH ของสารละลายที่อัตราส่วนบัฟเฟอร์ เป็นหนึ่งคือ 7.95 ดังนั้น

$$pOH^- = 6.05$$

$$OH^- = 10^{-6.05}$$

$$= 8.912 \times 10^{-5} \text{ กิโลกรัมไอออน/ลบ. ม.}$$

$$k_{OH^-}[OH^-] = (11.191 \times 10^3)(8.912 \times 10^{-5})$$

$$= 0.997 \quad (\text{วินาที})^{-1}$$

จากเอกสารอ้างอิง Danckwerts และ Sharma (1966)

$$k_{OH^-} \cdot K_w / K_2 = 0.7$$

ดังนั้น (Pseudo-first order rate constant)

$$k_{As} [As(OH)_2O^-] + k_{OH^-} [OH^-] = 2.304 \times 10^2 \quad (\text{วินาที})^{-1}$$

6. เงื่อนไขของปฏิกิริยา Pseudo-First order

จากสมการที่ (67) มีเงื่อนไขที่ใช้ในการบอกว่าปฏิกิริยาเป็น pseudo-first order หรือไม่โดย

$$C^* \left(\frac{1}{c} + \frac{2}{b} \right) \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{D_A k_{OH^-} [OH^-]}{k_L^2}} - 1 \right] \ll 1$$

เมื่ออัตราส่วนของบัฟเฟอร์เป็นหนึ่ง

$$C^* = 1.416 \times 10^{-3} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

$$c = [CO_3^{2-}] = 0.966$$

$$b = [HCO_3^-] = 0.966$$

$$k_{OH^-} [OH^-] = 0.997$$

สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายคำนวณจากการหาความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ Joosten และ Danckwerts ได้สรุปว่า

$$D \mu^{-0.82} = \text{Constant}$$

$$D_A (\text{in solution}) = D_A (\text{in water}) \left(\frac{\mu_{\text{water}}}{\mu_{\text{solution}}} \right)^{0.82}$$

สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

$$= 2.00 \times 10^{-9} \text{ ม./วินาที}$$

ความหนืดของน้ำที่ 29 องศาเซลเซียส = 0.8261 กก./ม.วินาที

ความหนืดของสารละลาย = 1.136 0.82

$$D_A = (2.00 \times 10^{-9}) \frac{0.8261}{1.136}$$

$$= 1.54 \times 10^{-9} \text{ ม./วินาที}$$

สมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของของเหลว (Liquid phase mass transfer coefficient)

$$k_L = 4.0 \times 10^{-4} \text{ ม./วินาที}$$

$$C^* \left(\frac{1}{c} + \frac{2}{b} \right) \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{D_A k_{OH^-} [OH^-]}{k_L^2}} - 1 \right]$$

$$= (1.416 \times 10^{-3}) \left(\frac{1}{0.966} + \frac{2}{0.966} \right) \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{(1.54 \times 10^{-5})(0.779)}{(4 \times 10^{-2})^2}} - 1 \right]$$

$$= 2.104 \times 10^{-5}$$

แสดงว่าเงื่อนไขข้างกล่าวมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมากๆ

7. เงื่อนไขของอาร์เซนไนท์ที่พื้นผิวสัมผัส

เมื่อใช้อาร์เซนไนท์เป็นตัวเร่งในการดูดซับก๊าซ ปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับสารละลายบัฟเฟอร์ เป็นชนิด Pseudo-First order ซึ่งเป็นการยืนยันเงื่อนไขของการที่มีตัวเร่งอยู่ที่พื้นผิวสัมผัสของฟองก๊าซ

ได้กำหนดเงื่อนไขไว้ดังนี้

$$\frac{C^* \left(\frac{1}{c} + \frac{2}{b} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{D_A k_{As} [As(OH)_2 O^-]}{k_L^2}} - 1 \right]}{1 + \left[\frac{k_{As(OH)_3}}{K_2} \right] \cdot \frac{c}{b}} \ll 1$$

จากผลที่ได้คำนวณ

$$\begin{aligned}
 K_{As} [As(OH)_2O^-] &= 229.413 && \text{วินาที} \\
 K_{As(OH)_3} &= 6.534 \times 10^{-10} && \text{กิโลกรัมไอออน/ลบ.ม.} \\
 K_2 &= 5.009 \times 10^{-11} && \text{กิโลกรัมไอออน/ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

ฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 & \frac{C^* \left(\frac{1}{C} + \frac{2}{B} \right) \left[\sqrt{1 + D_A K_{As} [As(OH)_2O^-] / K_L^2} - 1 \right]}{1 + \left[\frac{K_{As(OH)_3}}{K_2} \right] \cdot \frac{C}{B}} \\
 &= \frac{(1.416 \times 10^{-3}) \left(\frac{1}{0.966} + \frac{2}{0.966} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{(1.54 \times 10^3)(229.4)}{(4.0 \times 10^{-2})^2}} - 1 \right]}{1 + \frac{6.534 \times 10^{-10}}{5.009 \times 10^{-11}} \times \frac{0.966}{0.966}} \\
 &= 2.473 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นเงื่อนไขจึงเป็นจริง

8. การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลวและพื้นผิวสัมผัสก๊าซกับของเหลว

จากข้อมูลในการทดลองโดยใช้เครื่องผสมสติก ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 16 ไม่มีไฮเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเข้มข้นศูนย์ ไฮเดียมอาร์เซไนท์เข้มข้น 0.34 โมลาร์ จากการไทเทรตตัวอย่างสารละลายที่ได้ จากคลอสมันทำให้ทราบความเข้มข้นของคาร์บอนเนตและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับดังต่อไปนี้

| เวลา | ความเข้มข้นของคาร์บอนเนต ในสารละลาย | CO ₂ ที่ถูกดูดซับ (กิโลกรัมโมล/ ลบ.ม.) |
|--------|--|---|
| วินาที | (กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.) | ลบ.ม.) |
| 0.0 | 1.248 | 0.000 |
| 3.0 | 1.173 | 0.075 |
| 60 | 1.129 | 0.119 |

| เวลา วินาที | ความเข้มข้นของคาร์บอนต ในสารละลาย (กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.) | ที่ถูกดูดซึม (กิโลกรัมโมล/ ลบ.ม.) |
|----------------|---|---|
| 90 | 1.095 | 0.153 |
| 120 | 1.040 | 0.208 |
| 150 | 0.980 | 0.265 |
| 180 | 0.963 | 0.285 |
| 360 | 0.947 | 0.301 |
| 540 | 0.937 | 0.311 |
| 720 | 0.940 | 0.308 |

เมื่อทำการหาสมการโพลีโนเมียลกำลังสามคือ (Tasakorn , 1972)

$$Y = A_0 + A_1 t + \frac{A_2}{2} t^2 + \frac{A_3}{3} t^3$$

Y เป็นปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึม

t เป็นเวลาที่ตัวอย่างสารละลายที่ได้จากการทดลอง

ผลของการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

$$Y = 1.965 \times 10^{-3} + 0.139t - 0.019t^2 + 8.018 \times 10^{-4} t^3$$

หาความชันของเส้นกราฟที่อัตราส่วนของบีฟเฟอร์ เป็นหนึ่ง

$$\text{ซึ่ง } \left[\text{KCO}_3 \right]_2 = \left[\text{KHCO}_3 \right]_3 = 0.966 \text{ กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

$$\text{เวลาที่จุดนี้} = 174.6 \text{ วินาที}$$

$$\text{ความชัน } \frac{dY}{dt} = 0.048 \text{ กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.วินาที}$$

$$t = 174.6$$

$$\text{ปริมาตรของคอลัมน์} = 3.43 \times 10^{-3} \text{ ลบ.ม.}$$

ดังนั้นอัตราการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$(R_d') = \frac{\text{ความชัน}}{60} \times \frac{\text{ปริมาตรของสารละลาย}}{\text{ปริมาตรของคอลัมน์}}$$

$$= \frac{0.048}{60} \times \frac{0.006}{0.034}$$

$$= 1.400 \times 10^{-4} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.มวินาที}$$

ด้วยวิธีการ เช่นเดียวกับที่ได้คำนวณมาแล้วทำให้หาอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายไม่มีตัวเร่งไคยล

$$(R_d) \text{ ไม่มีตัวเร่ง} = 2.947 \times 10^{-5} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม. วินาที}$$

อัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้น x ปริมาตรของสารละลาย x conversion factor

$$= 0.048 \frac{\text{กิโลกรัมโมล}}{\text{ม}^3 \text{วินาที}} \times 6 \times 10^3 \text{ม}^3 \times 22.4 \frac{\text{ม}^3}{\text{กิโลกรัมโมล}} \times \frac{302 \text{ K}}{273 \text{ K}}$$

$$= (0.048)(6 \times 10^3)(22.4 \times \frac{302}{273}) \quad \text{ลบ.ม./วินาที}$$

ในเทอมความเร็วไหลผ่านของก๊าซ (superficial gas velocity)

$$\text{อัตราการดูดซับ} = (0.048)(6 \times 10^3)(\frac{22.4 \times 302}{273}) \frac{1 \text{ ลบ.ม./วินาที}}{1.82 \times 10^{-2}}$$

$$= (0.048)(6 \times 10^3)(0.136)$$

$$= 1.41 \times 10^{-4}$$

อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$= \frac{(1132.8)}{(182.48)} \cdot \frac{1}{100} - 1.41 \times 10^{-4} = 0.062$$

โมลสัคส่วน (mole fraction) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$= \frac{0.062}{0.062 + 0.049} = 0.529$$

จากการคำนวณที่ผ่านมา ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์

$$H = 1.416 \times 10^{-2} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

ที่ความดันบรรยากาศ

$$C^* = H \times \text{mole fraction} \times \text{pressure}$$

$$C^* = (1.416 \times 10^2) (0.529)(1) \\ = 7.49 \times 10^{-3}$$

$$C^* - C_b = 7.49 \times 10^{-3} = 1.04 \times 10^{-4} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.} \\ = 7.385 \times 10^{-3} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

แรงขับ (driving force) ในระบบไม่มีตัวเร่งก็ทำในลักษณะเดียวกัน

$$C^* - C_b = 7.706 \times 10^{-3} \quad \text{กิโลกรัมโมล/ลบ.ม.}$$

9. การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในสถานะของเหลวและพื้นผิว สัมผัสโดยวิธี Danckwerts plot

การคูณขึ้นที่เกิดจากปฏิกิริยา

$$T_A = R \cdot d' = d'(C^* - C_b) \cdot \sqrt{k_L^2 + D_A \left\{ k_{AS} [As(OH)_2 O^-] + k_{OH} [OH^-] \right\}}$$

$$\left(\frac{T_A}{C^* - C_b} \right)^2 = k_L^2 d'^2 + D_A d'^2 \left\{ k_{AS} [As(OH)_2 O^-] + k_{OH} [OH^-] \right\}$$

นำค่าต่างที่คำนวณไว้แล้วมาสร้างเป็นตาราง

| ตัวเร่ง (M) | $\left\{ \begin{array}{l} k_{AS} [As(OH)_2 O^-] \\ + k_{OH} [OH^-] \end{array} \right\}$ | $R \cdot d'$ | $C^* - C_b$ | $\left(\frac{T_A}{C^* - C_b} \right)^2$ |
|----------------|--|------------------------|------------------------|--|
| 0 | 0.997 | 2.947×10^{-5} | 7.7×10^{-3} | 1.462×10^{-5} |
| 0.34 | 2.304×10^{-2} | 1.4×10^{-4} | 7.385×10^{-3} | 35.93×10^{-5} |

จากนั้นเอาค่า $\left(\frac{T_A}{C^* - C_b} \right)^2$ กับ $k_{AS} [As(OH)_2 O^-] + k_{OH} [OH^-]$ ไปสร้างกราฟ ระหว่างจุดทั้งสองได้กราฟเส้นตรง

$$\begin{aligned} \text{Y-intercept} &= k_L^2 d'^2 = 1.312 \times 10^{-5} \\ \text{ความชัน (slop)} &= D_A d'^2 = 1.502 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

จาก

$$D_A = 1.54 \times 10^{-9} \text{ ตร.ม./วินาที}$$

$$d'^2 = \frac{1.502 \times 10^{-6}}{1.54 \times 10^{-9}}$$

$$d' = 3.12 \times 10^{-3}$$

$$k_L^2 d'^2 = 1.31 \times 10^{-5}$$

$$k_L = 1.16 \times 10^{-4}$$

ดังนั้น

$$k_L d' = 3.62 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

10. การหาความเร็วไหลผ่านของก๊าซ U_G

$$U_G = \frac{\text{อัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่คอลัมน์}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}}$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์} = 0.15 \text{ ม.}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์} = \frac{\pi (0.15)^2}{4}$$

$$= 0.18 \times 10^{-1} \text{ ม}^2$$

$$\text{อัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่คอลัมน์} = \frac{1132.8 \times 10^{-6}}{60} \text{ ม}^3/\text{วินาที}$$

$$\text{ความเร็วไหลผ่านของก๊าซ} = \frac{1132.8 \times 10^{-6}}{0.018 \times 60} \text{ ม./วินาที}$$

$$= 10.35 \times 10^{-4} \text{ "}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. การหาแรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนโดยใช้ Thomas stormer viscometer

เครื่องหาแรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของของเหลวถูกกำลังที่ใช้ในการทดลองคือเครื่อง Thomas stormer viscometer ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ ก. 5 ในการหาอัตราเฉือนและแรงเค้นเฉือนต้องทราบน้ำหนักที่ใส่ลงเพื่อให้ rotor หมุน จำนวนรอบที่ rotor หมุน และระยะเวลาที่ลู่ น้ำหนักตกลงในระยะความสูงใดๆ

| | | |
|-------|-----|--|
| T_2 | คือ | แรงที่ของเหลวกระทำต่อ cylindrical rotor |
| T_1 | " | น้ำหนักที่ใส่ลงเพื่อให้ cylindrical rotor หมุน |
| D_1 | " | เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนหมุนชกเข็มนาฬิกา |
| D_2 | " | เส้นผ่าศูนย์กลางของ cylindrical rotor |
| D_3 | " | เส้นผ่าศูนย์กลางภายในจานโลหะของเหลว |
| N_1 | " | จำนวนรอบที่หมุนโดยแกนชกเข็มนาฬิกา |
| N_2 | " | จำนวนรอบที่หมุนโดย cylindrical rotor |
| h | " | ความสูงของสารละลาย |

แรงที่กระทำให้ rotor หมุนมีสองอย่างคือแรงที่เกิดจากความต้านทานของของเหลวและแรงที่เกิดจากน้ำหนัก ดังนั้น

$$T_1 N_1 D_1 = D_2 N_2 T_2 \quad (78)$$

จากการทดลองให้เข็มนาฬิกายาว 1.02 เมตรทำให้ rotor หมุน 12 รอบ

ค่าต่างๆที่วัดได้ $D_1 = 2.87 \times 10^{-2}$ เมตร

$D_2 = 3.00 \times 10^{-2}$ เมตร

$D_3 = 4.77 \times 10^{-2}$ เมตร

$h = 3.48 \times 10^{-2}$ เมตร

ฉะนั้น N_1 หมุน 1 รอบ = N_2 หมุน 125 รอบ

1 รอบของ $N_1 = 2\pi R = \pi D_1$

$= \pi \times 2.87 \times 10^{-2}$

$= 9.02 \times 10^{-2}$ เมตร

$$\begin{aligned} \text{ถ้าความยาว } 1.02 \text{ เมตร } N_1 \text{ จะหมุน} &= \frac{1.02}{9.02 \times 10^{-2}} \text{ รอบ} \\ &= 11.26 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

$$N_1 \text{ หมุน } 11.26 \text{ รอบเท่ากับ } N_2 \text{ หมุน } 125 \text{ รอบ/วินาที}$$

$$\begin{aligned} N_1 \text{ " } 1 \text{ " } N_2 \text{ " } &= \frac{125}{11.26} \text{ " } \\ &= 11.09 \text{ " } \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (78) หาแรงเค้นเฉือนได้} &= \frac{T_2}{2 \pi D_2 h} \\ \tau &= \frac{N_1 D_1 T_1 g}{2 \pi N_2 D_2^2 h} \quad (79) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \tau &= \text{แรงเค้นเฉือน (กิโลกรัม/เมตร วินาที)} \\ g &= \text{ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง} \\ &= 9.81 \text{ เมตร/วินาที}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆ} &= \frac{(11.1 N_2)(2.87 \times 10^{-2})(9.81)(T_1)}{2 \pi (3.0 \times 10^{-2})(3.48 \times 10^{-2})} \quad (80) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาอัตราเฉือนด้วยสมการ} & \dot{\gamma} = \frac{\pi N_1 D_2}{0.5(D_3 - D_2)} \\ \dot{\gamma} &= \text{อัตราเฉือน} \\ \text{แทนค่าคงที่ต่างๆ} & \dot{\gamma} = \frac{\pi \times N_2 \times 3.0 \times 10^{-2}}{0.5(4.77 - 3.0) \times 10^{-2}} \quad (81) \\ &= 10.65 N_2 \end{aligned}$$

จากการหาแรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนจึงใช้สมการที่ (80) และ (81) เสนอการหาค่าแรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของของเหลวที่มีไซเคียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเข้มข้นร้อยละ 0.5 ใช้ลูกน้ำหนัก 3 กรัม จำนวนรอบที่ N_2 หมุนเท่ากับ 0.73 รอบ

$$\text{จากสมการที่ (80)} \quad \tau = \frac{(11.09 N_2)(2.82 \times 10^{-2})(9.81)(T_1)}{2 \pi (3.0 \times 10^{-2})^2 (3.48 \times 10^{-2})}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad N_2 &= 0.732 \quad \text{รอบ/วินาที} \\ T_1 &= 3 \times 10^{-3} \quad \text{กิโลกรัม} \end{aligned}$$

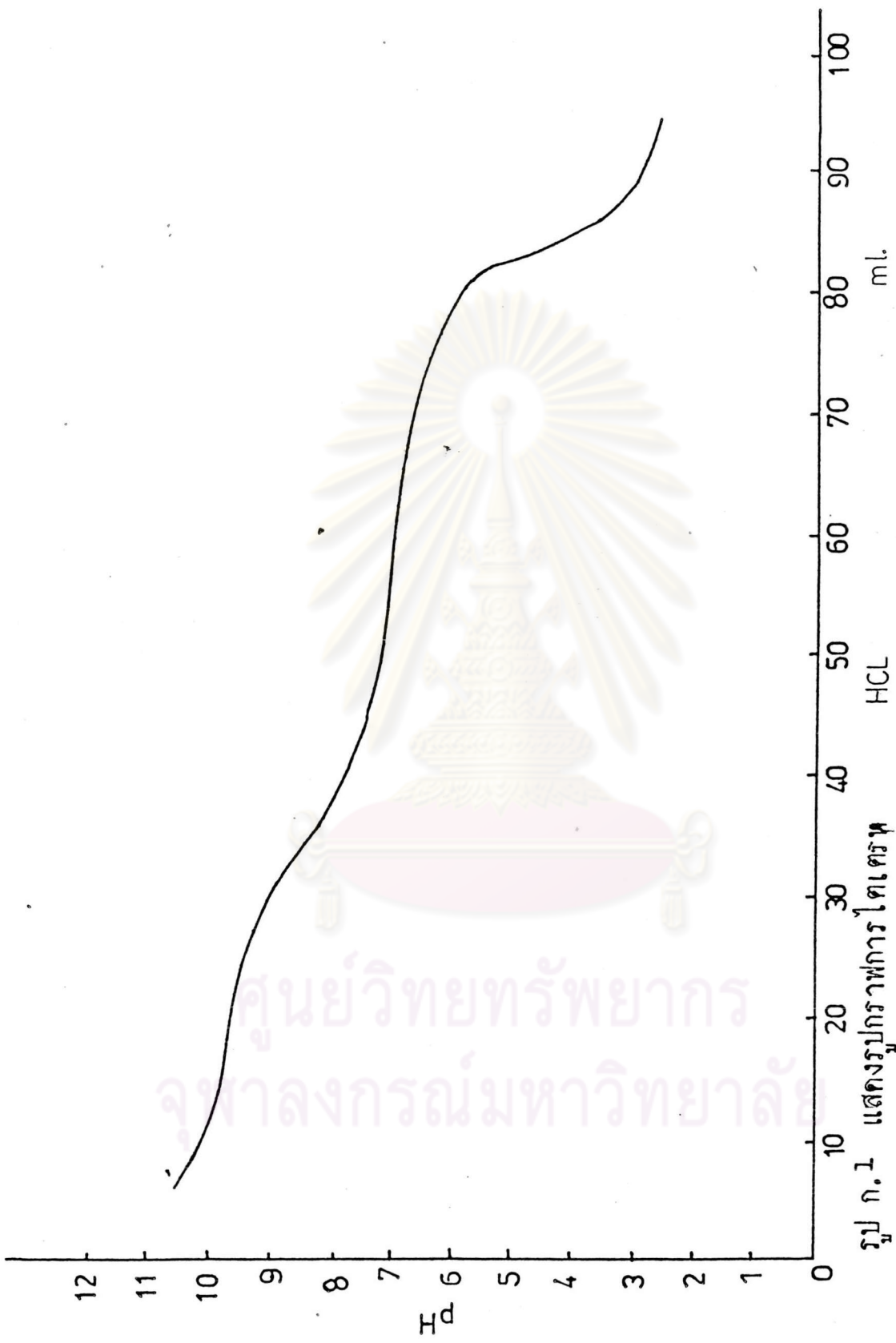
= 47.6 กิโลกรัม/เมตร วินาที²

หาอัตราเร็วในโค้งจากสมการ (81)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= 10.65 N_2 \\ N_2 &= 0.73 \\ \dot{\varphi} &= 10.65 \times 0.73 \\ &= 7.80 \quad (\text{วินาที})^{-1} \end{aligned}$$



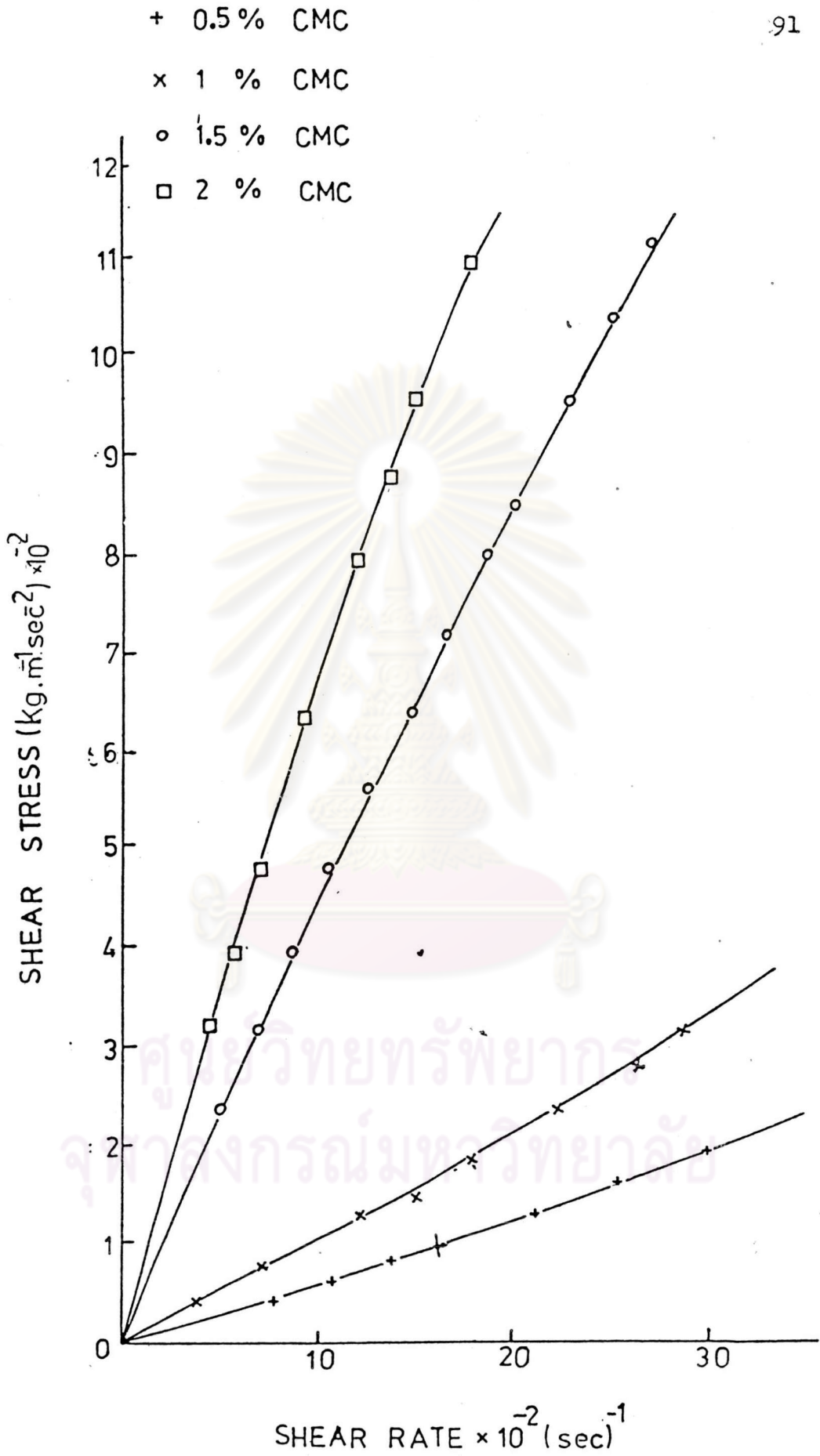
ศูนย์วิทยพัชากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



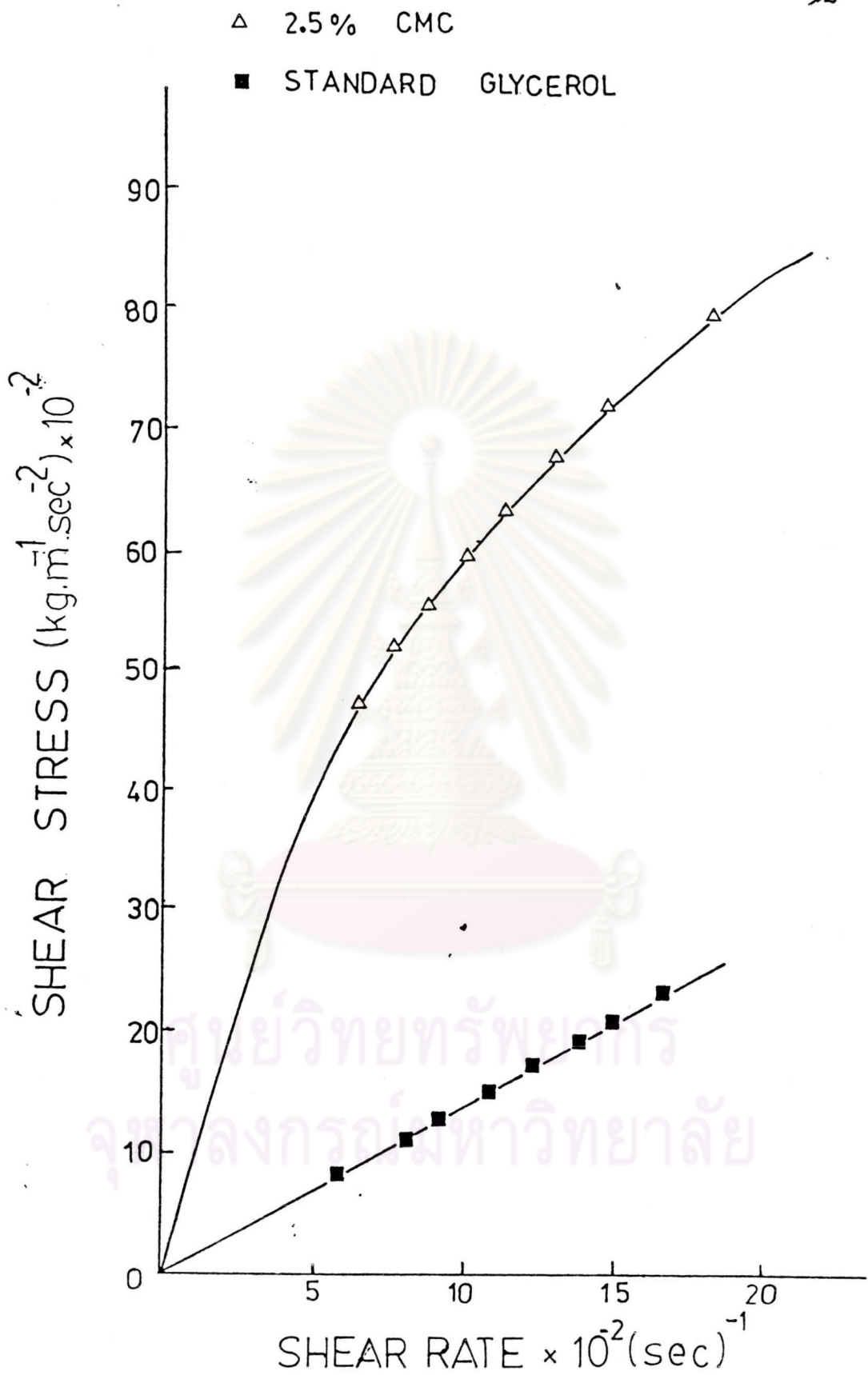
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป ก.1 แสดงรูปกราฟการไทเทรต

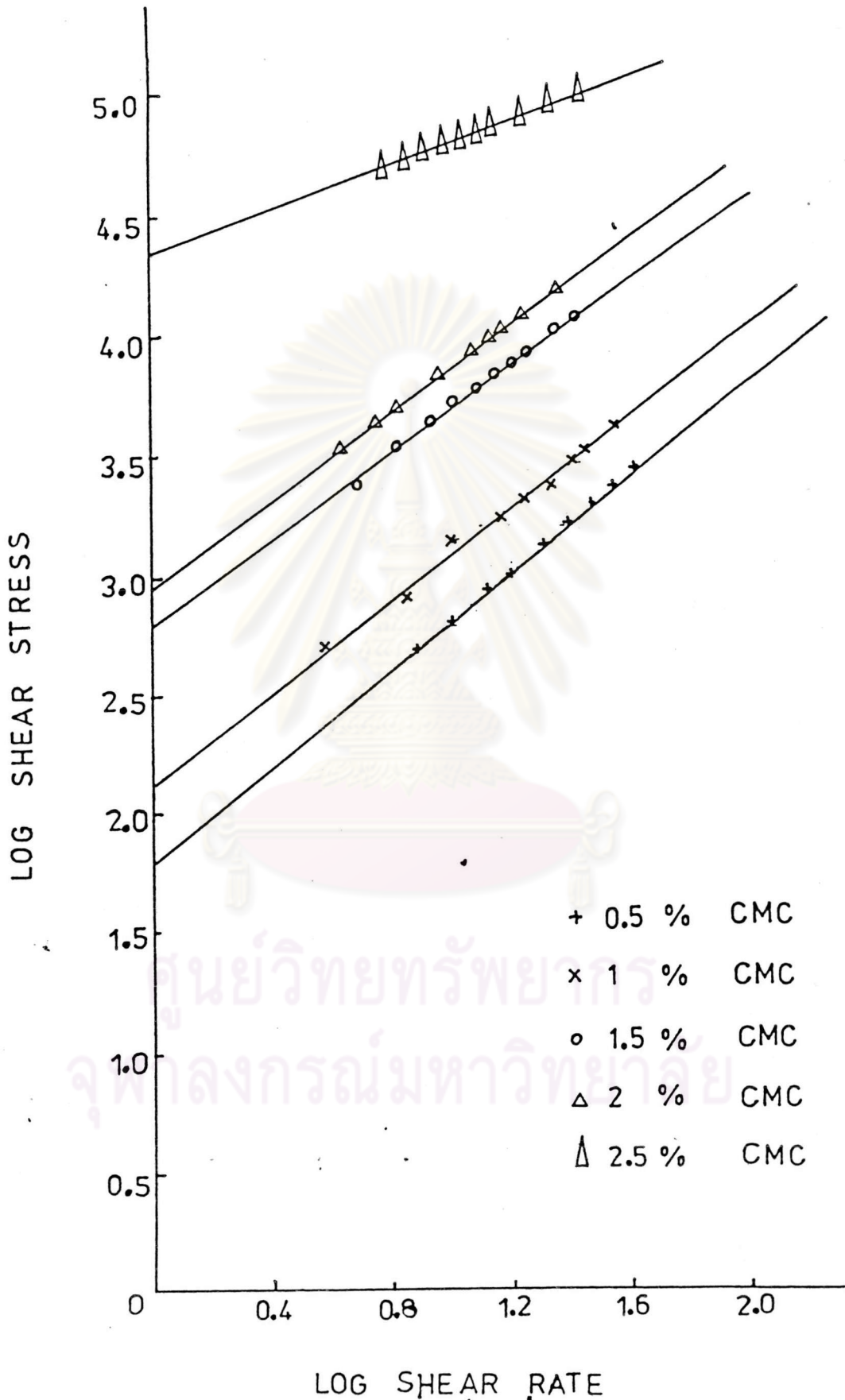
ของกรดเกลือกับสารละลายตัวอย่าง



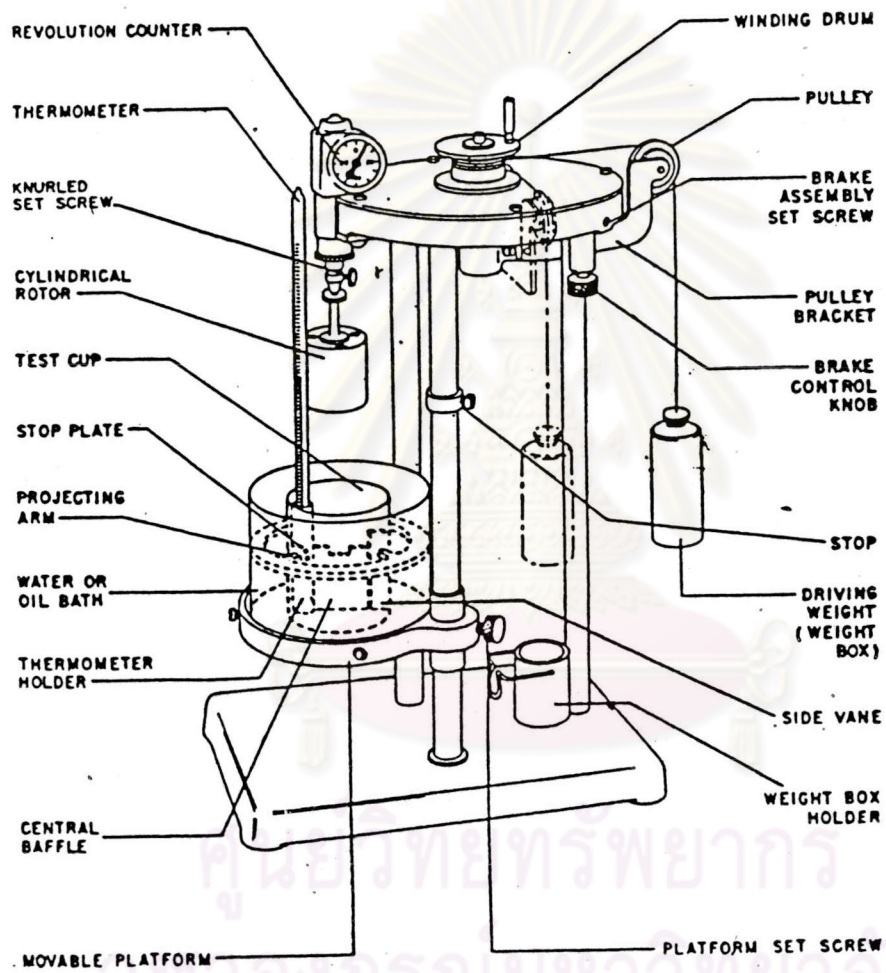
รูป ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน



รูป ก. 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน



รูป ก. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log shear stress กับ log shear rate



รูป น. 5

Thomas Storer Viscometer

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ข. 1 แสดงคุณสมบัติของสารละลาย

| CMC % น.น. | 0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
|---|------|------|------|------|------|-------|
| ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) $\times 10^{-3}$ | 1.27 | 1.28 | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.30 |
| แรงตึงผิว (นิวตัน/ตร.ม.) $\times 10^{-2}$ | 7.83 | 5.41 | 5.50 | 6.32 | 6.94 | 7.01 |
| ความหนืด (กก./ม.วินาที) $\times 10^{-1}$ | 1.13 | - | - | - | - | - |
| Consistency index (m) (กก.ม. ¹ วินาที ⁿ⁻²) $\times 10^{-3}$ | | 0.06 | 0.13 | 0.65 | 0.89 | 2.089 |
| power index (n) | | 0.79 | 0.76 | 0.71 | 0.68 | 0.37 |
| ความหนืดปรากฏ (กก./ม.วินาที) $\times 10^{-2}$ | | 0.16 | 0.29 | 1.00 | 1.20 | 4.07 |

$U_G = .001$ ม./วินาที

ตารางที่ ข. 2 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ

glycerol

| น้ำหนัก (กก.) | เวลา (วินาที/100รอบ) | รอบต่อเวลา (รอบ/ วินาที) | shear stress (กก.ม ¹ . วินาที ²) | shear rate (วินาที) ⁻¹ |
|-------------------|-------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| $\times 10^3$ | $\times 10^{-2}$ | | $\times 10^{-3}$ | $\times 10^{-2}$ |
| 50 | 1.82 | 0.55 | 0.79 | 5.86 |
| 70 | 2.31 | 0.76 | 1.11 | 8.14 |
| 80 | 1.16 | 0.86 | 1.27 | 9.21 |
| 100 | 0.97 | 1.02 | 1.59 | 10.89 |
| 110 | 0.86 | 1.15 | 1.74 | 12.29 |
| 120 | 0.78 | 1.28 | 1.90 | 13.63 |
| 130 | 0.71 | 1.40 | 2.06 | 14.93 |
| 150 | 0.60 | 1.64 | 2.38 | 16.40 |

ตารางที่ ข. 3 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ 0.5
เปอร์เซ็นต์ CMC

| น้ำหนัก (กก.) $\times 10^3$ | เวลา (วินาที/100 รอบ) $\times 10^{-2}$ | รอบต่อเวลา (รอบ/วินาที) | shear stress (กก.ม. วินาที ⁻²) $\times 10^{-2}$ | shear rate (วินาที ⁻¹) $\times 10^{-2}$ |
|-----------------------------------|---|----------------------------|--|---|
| 3 | 1.36 | 0.73 | 0.48 | 7.80 |
| 4 | 0.99 | 1.00 | 0.63 | 10.71 |
| 5 | 0.78 | 1.27 | 0.79 | 13.56 |
| 6 | 0.66 | 1.52 | 0.95 | 16.23 |
| 8 | 0.50 | 1.97 | 1.27 | 21.08 |
| 10 | 0.42 | 2.37 | 1.59 | 25.31 |
| 12 | 0.36 | 2.78 | 1.91 | 29.61 |
| 15 | 0.30 | 3.34 | 2.39 | 35.62 |
| 18 | 0.27 | 3.84 | 2.85 | 40.97 |
| 20 | 0.24 | 4.13 | 3.17 | 44.00 |

ตารางที่ ข. 4 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ 1
เปอร์เซ็นต์ CMC

| น้ำหนัก (กก.) $\times 10^3$ | เวลา (วินาที/100 รอบ) $\times 10^{-2}$ | รอบต่อเวลา (รอบ/วินาที) | shear stress (กก. ม.วินาที ⁻²) วินาที ⁻² $\times 10$ | shear rate (วินาที ⁻¹) $\times 10$ |
|------------------------------------|--|----------------------------|--|--|
| 3 | 2.80 | 0.35 | 0.48 | 3.81 |
| 5 | 1.50 | 0.66 | 0.80 | 7.06 |
| 8 | 0.89 | 1.12 | 1.27 | 11.99 |
| 10 | 0.71 | 1.39 | 1.59 | 14.87 |
| 12 | 0.59 | 1.67 | 1.90 | 17.83 |
| 15 | 0.49 | 2.06 | 2.38 | 21.96 |
| 18 | 0.41 | 2.45 | 2.86 | 26.11 |
| 20 | 0.37 | 2.66 | 3.18 | 28.36 |
| 25 | 0.31 | 3.24 | 3.95 | 34.50 |

ตารางที่ ข. 5 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ 1.5 เปอร์เซ็นต์ CMC

| น้ำหนัก (กก.) $\times 10^3$ | เวลา (วินาที/100 รอบ) $\times 10^{-2}$ | รอบต่อเวลา (รอบ/วินาที) | shear stress (กก.ม. วินาที ⁻²) $\times 10^{-2}$ | shear rate (วินาที ⁻¹) $\times 10^{-2}$ |
|-----------------------------------|---|----------------------------|--|---|
| 15 | 0.22 | 0.45 | 2.38 | 4.88 |
| 20 | 0.16 | 0.63 | 3.17 | 6.71 |
| 25 | 0.12 | 0.80 | 3.97 | 8.58 |
| 30 | 1.02 | 0.97 | 4.76 | 10.41 |
| 35 | 0.86 | 1.16 | 5.55 | 12.37 |
| 40 | 0.74 | 1.35 | 6.35 | 14.37 |
| 45 | 0.63 | 1.54 | 7.14 | 16.43 |
| 50 | 0.58 | 1.72 | 7.94 | 18.38 |
| 60 | 0.47 | 2.12 | 9.52 | 22.65 |
| 65 | 0.43 | 2.32 | 10.31 | 24.74 |
| 70 | 0.40 | 2.52 | 11.11 | 26.84 |

ตารางที่ ข. 6 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ 2
เปอร์เซนต์ CMC

| น้ำหนัก (กก.) $\times 10^3$ | เวลา (วินาที/100 รอบ) $\times 10^{-2}$ | รอบต่อเวลา (รอบ/วินาที) | shear stress (กก.ม. วินาที ⁻²) $\times 10^{-2}$ | shear rate (วินาที ⁻¹) $\times 10^{-2}$ |
|-----------------------------------|---|----------------------------|--|---|
| 20 | 2.85 | 0.40 | 3.17 | 4.28 |
| 25 | 1.91 | 0.52 | 3.97 | 5.56 |
| 30 | 1.58 | 0.63 | 4.76 | 6.72 |
| 40 | 1.15 | 0.86 | 6.35 | 9.23 |
| 50 | 0.91 | 1.10 | 7.94 | 11.75 |
| 55 | 0.79 | 1.26 | 8.76 | 13.50 |
| 60 | 0.72 | 1.39 | 9.53 | 14.82 |
| 70 | 0.61 | 1.63 | 11.11 | 17.45 |
| 80 | 0.53 | 1.91 | 12.69 | 20.36 |
| 90 | 0.45 | 2.19 | 14.29 | 23.38 |

ตารางที่ ข.7 แสดงความสัมพันธ์แรงเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ 2.5 เปอร์เซ็นต์ CMC

| น้ำหนัก (กก.) $\times 10^3$ | เวลา (วินาที/100 รอบ) $\times 10^{-2}$ | รอบต่อเวลา (รอบ/วินาที) | shear stress (กก.ม. วินาที ⁻²) $\times 10^{-3}$ | shear rate (วินาที ⁻¹) $\times 10^{-2}$ |
|-----------------------------------|---|----------------------------|--|---|
| 300 | 1.69 | 0.58 | 4.76 | 6.27 |
| 325 | 1.45 | 0.68 | 5.16 | 7.33 |
| 350 | 1.25 | 0.79 | 5.55 | 8.47 |
| 375 | 1.09 | 0.91 | 5.95 | 9.76 |
| 400 | 0.95 | 1.04 | 6.35 | 11.15 |
| 425 | 0.84 | 1.18 | 6.75 | 12.62 |
| 450 | 0.74 | 1.34 | 7.14 | 14.35 |
| 500 | 0.59 | 1.69 | 7.94 | 17.99 |
| 550 | 0.47 | 2.08 | 8.73 | 22.25 |
| 600 | 0.38 | 2.62 | 9.53 | 27.98 |



ตารางที่ ข.8 แสดงผลของอัตราการไหลของก๊าซในคอลัมน์ห้องก๊าซ

| อัตราการไหล ของก๊าซ ลบ.ม./วินาที $\times 10^4$ | อัตราการดูดซึม กก. โมล/ ลบ.ม.วินาที $\times 10^5$ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลใน ของเหลว ม./วินาที $\times 10^5$ | พื้นที่ผิวสัมผัส ม. ⁻¹ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลคือ ปริมาตร วินาที ⁻¹ $\times 10^3$ |
|---|--|---|--------------------------------------|---|
| 0.05 | 8.17 | 16.00 | 39.7 | 3.09 |
| 0.10 | 13.70 | 8.80 | 8.2 | 3.17 |
| 0.20 | 11.96 | 17.00 | 20.8 | 3.53 |
| 0.40 | 9.38 | 14.00 | 25.3 | 3.53 |
| 0.80 | 1.15 | 7.00 | 4.9 | 3.43 |

| | | |
|------------------------------------|------|----------------|
| อัตราการไหลของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของของเหลวในคอลัมน์ | 0.32 | ม. |
| เส้นผ่านศูนย์กลางรูกระจายก๊าซ | 0.50 | มม. |
| ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | 4 | โมลเปอร์เซ็นต์ |
| ความเข้มข้นของ CMC | 0 | เปอร์เซ็นต์ |

ตารางที่ ข.9 แสดงผลของอัตราการไหลของก๊าซในคอลัมน์เครื่องผสมสถิตย์

| อัตราการไหล ของก๊าซ ลบ.ม./วินาที $\times 10^5$ | อัตราการดูดซึม กก. โมล/ ลบ.ม.วินาที $\times 10^5$ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลใน ช่องเหลว ม./วินาที $\times 10^4$ | พื้นที่ผิวสัมผัส ม. ⁻¹ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลต่อ ปริมาตร วินาที ⁻¹ |
|---|--|--|--------------------------------------|--|
| 3.29 | 5.01 | 8.67 | 22.48 | 0.019 |
| 6.58 | 4.31 | 8.56 | 19.88 | 0.017 |
| 9.87 | 7.71 | 3.72 | 75.36 | 0.028 |
| 17.20 | 7.97 | 4.09 | 66.69 | 0.027 |
| 24.70 | 6.67 | 3.45 | 68.35 | 0.023 |

| | | |
|------------------------------------|------|----------------|
| อัตราการไหลของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของช่องเหลวในคอลัมน์ | 1.77 | ม. |
| เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกระจายก๊าซ | 0.5 | มม. |
| ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | 5 | โมลเปอร์เซ็นต์ |
| ความเข้มข้นของ CMC | 0 | เปอร์เซ็นต์ |

ตารางที่ ข.10 แสดงผลของอัตราส่วนก๊าซในคอลัมน์ฟังก์ชัน

| ความเข้มข้น CO ₂ โมล เปอร์เซ็นต์ | อัตราการดูดซับ กก. โมล/ ลบ.ม. วินาที ⁴ x10 | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลใน ของเหลว ม./ 5 วินาที ⁵ x10 | พื้นผิวสัมผัส ¹ -1 ม. | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลต่อ วินาที ⁻¹ x10 ³ |
|---|--|---|--|---|
| 1 | 0.44 | 9.0 | 41.8 | 3.76 |
| 2 | 0.45 | 12.0 | 31.4 | 3.77 |
| 4 | 1.08 | 15.0 | 23.3 | 3.49 |
| 8 | 1.49 | 10.0 | 33.4 | 3.34 |
| 16 | 1.78 | 9.0 | 41.6 | 3.65 |

| | | |
|-------------------------------|-------|--------------|
| อัตราการไหลของก๊าซผสม | 0.001 | ม./วินาที |
| อัตราการไหลของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของของเหลวในคอลัมน์ | 0.32 | ม. |
| เส้นผ่านศูนย์กลางรูกระจายก๊าซ | 0.50 | มม. |
| ความเข้มข้นของ CMC | 0 | เปอร์เซ็นต์ |

ตารางที่ ข.11 แสดงผลของอัตราส่วนของก๊าซในคอลัมน์เครื่องผสมสัจจัย

| ความเข้มข้น CO ₂ โมลเปอร์เซ็นต์ | อัตราการดูดซึม กก. โมล/ ม. วินาที ⁴ x10 | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลในช่อง ของเหลว ม/วินาที ⁵ x10 | พื้นที่ผิวสัมผัส ม. ⁻¹ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลต่อ วินาที ⁻¹ x10 ³ |
|---|---|---|--------------------------------------|---|
| 1 | 0.12 | 13.0 | 27.0 | 3.78 |
| 2 | 1.16 | 14.0 | 29.5 | 3.57 |
| 4 | 1.49 | 10.0 | 33.4 | 3.34 |
| 8 | 1.50 | 9.0 | 33.7 | 3.37 |
| 16 | 1.40 | 11.6 | 31.2 | 3.62 |

| | | |
|-------------------------------|-------|--------------|
| อัตราการใช้ของก๊าซผสม | 0.001 | ม./วินาที |
| อัตราการใช้ของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของช่องเหลวในคอลัมน์ | 0.32 | ม. |
| เส้นผ่านศูนย์กลางรูกระจายก๊าซ | 0.5 | มม. |
| ความเข้มข้นของ CMC | 0 | เปอร์เซ็นต์ |

ตารางที่ ข. 12 แสดงผลของของเหลวที่กำลังในคอลัมน์ฟองก๊าซ

| ความเข้มข้น ของ CMC เปอร์เซ็นต์ | อัตราการดูดซึม กก. โมล/ วินาที $\times 10^4$ | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลใน ของเหลว ม./วินาที $\times 10^5$ | พื้นผิวสัมผัส ม. ² | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลต่อ ปริมาตร วินาที $\times 10^3$ |
|---------------------------------------|--|---|----------------------------------|--|
| 0.5 | 1.19 | 13.9 | 26.3 | 3.65 |
| 1.0 | 1.49 | 10.7 | 33.4 | 3.57 |
| 1.5 | 1.75 | 8.76 | 39.8 | 3.48 |
| 2.0 | 2.36 | 5.63 | 35.7 | 3.14 |
| 2.5 | 2.57 | 4.86 | 61.1 | 2.97 |

| | | |
|------------------------------------|-------|----------------|
| อัตราการไหลของก๊าซผสม | 0.001 | ม./วินาที |
| อัตราการไหลของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของของเหลวในคอลัมน์ | 32 | ม. |
| ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | 4 | โมลเปอร์เซ็นต์ |
| เส้นผ่านศูนย์กลางรูกระจายก๊าซ | 0.5 | มม. |

ตารางที่ ข. 13 แสดงผลของของเหลวถูกกำลังในคอลัมน์เครื่องผสมสัจติย

| ความเข้มข้น ของ CMC เปอร์เซ็นต์ | อัตราการดูดซึม กก. โมล/ ม. ³ วินาที ⁴ x10 | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลใน ของเหลว ม./วินาที ⁵ x10 | พื้นผิวสัมผัส ¹ ม. ² | สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลต่อ ปริมาตร ⁻¹ วินาที ³ x10 |
|---------------------------------------|--|--|---|--|
| 0.5 | 1.46 | 11.0 | 32.6 | 3.60 |
| 1.0 | 2.19 | 6.37 | 51.1 | 3.25 |
| 1.5 | 2.28 | 5.99 | 53.4 | 3.20 |
| 2.0 | 3.30 | 3.06 | 67.0 | 2.08 |
| 2.5 | 3.50 | 1.92 | 87.4 | 1.68 |

| | | |
|------------------------------------|-------|----------------|
| อัตราการไหลของก๊าซ | 0.001 | ม./วินาที |
| อัตราการไหลของสารละลาย | 0.16 | ม./วินาที |
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | 0.15 | ม. |
| อุณหภูมิ | 29 | องศาเซลเซียส |
| ความสูงของของเหลวในคอลัมน์ | 0.32 | ม. |
| ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | 4 | โมลเปอร์เซ็นต์ |
| เส้นผ่านศูนย์กลางกระจายก๊าซ | 0.50 | มม. |



ภาคผนวก ค

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนข้อความ

- A = ก๊าซถูกละลายในของเหลว
- a' = พื้นผิวสัมผัสก๊าซกับของเหลว (specific gas liquid interface area)
- B = สารทำปฏิกิริยาในของเหลว
- b = ค่าคงที่ในสมการที่ 24
- b' = ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตในเนื้อของเหลว (Bulk)
- b'_1 = ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตที่พื้นผิวสัมผัส (Interfacial)
- C_{BL} = ความเข้มข้นของสารที่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของเหลว
- C_b = ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซในเนื้อของเหลว
- C^* = ความเข้มข้นสมมูลของก๊าซ
- c = ความเข้มข้นของคาร์บอเนต
- D_A = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของก๊าซ A ในของเหลว
- D_B = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของสารทำปฏิกิริยา B ในของเหลว
- D_C = เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์
- D_1 = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (molecular diffusivity) ของโมเลกุลตัวถูกละลายในของเหลว
- D_L = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของสารถูกละลายในของเหลว
- d = ค่าคงที่ในสมการ 24
- d_{b1} = เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซ
- d_e = เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของฟองก๊าซ (equivalent diameter)
- d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกระจายก๊าซ (orifice)
- d_{vs} = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยปริมาตรต่อพื้นที่
- f_A = องค์ประกอบปฏิกิริยา (reaction factor)
- g = แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
- H = ค่าคงที่เฮนรี (Henry constant)

- H_1 = ความสูงของการกระจาย
 h = ความสูงของคอลัมน์
 I = ความแรงของอิเล็กตรอน
 K_d = ค่าจากสมการ $(K_d K_f)^{-1} = 1.0 \times 10^{-4}$
 K_f = อัตราส่วน K_w / K_2
 K_m = สัมประสิทธิ์การคูณทั้งหมดของปฏิกิริยา pseudo-m th order
 K_m^* = ค่าคงที่ในสมการที่ 21
 K_w = ค่าแตกตัวของน้ำ (dissociation constant) ของน้ำ
 k_{As} = อัตราคงที่ (rate constant) ของ $As(OH)_2O^-$
 k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในของเหลว
 k_L^a = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรในของเหลว
 $(k_L^a)_P$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรในของเหลวกฎกำลัง
 $(k_L^a)_N$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรในของเหลว Newtonian
 k_m = อัตราคงที่ (rate constant) ของปฏิกิริยา pseudo-m th order
 $k_{m,n}$ = อัตราคงที่ (rate constant) ของปฏิกิริยากำลัง m และ n
 k_{OH}^- = อัตราคงที่ (rate constant) ของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮดรอกซิลอิออน
 k_{H_2O} = อัตราคงที่ (rate constant) ของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ
 K_1 = ค่าแตกตัวที่หนึ่งของกรดคาร์บอนิก (first dissociation constant)
 K_2 = ค่าแตกตัวที่สองของกรดคาร์บอนิก (second dissociation constant)
 k_2 = อัตราคงที่ (rate constant) กำลังสองของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ถูกละลายกับสารทำปฏิกิริยาในของเหลว
 M = ความเข้มข้นโมลาร์ (Molar)
 M' = โมดูลัส (modulus) ของของเหลว
 $M_{i,j}$ = น้ำหนักโมเลกุลของ i และ j

m = ค่าดัชนีคงตัว (constant index)

m' = กำลังปฏิกิริยา (reaction order) ของสาร A

m'' = ค่าดัชนีคงตัว (consistency index) ในสมการ 29, 30

N_{Bo} = Bond number = $gD_c^2 \rho / \sigma$

N_{De} = Dean number ในสมการ 29 $N_{sh} = \frac{k_L d_{vs}}{D_1}$

N_{Fr} = Froude number = $U_G / \sqrt{gD_c}$

N_{Ga} = Galilei number = gD_c^3 / ν_L^2

N_{Ha} = Hatta number ในสมการ 17

N_1 = โมเลกุลที่ 1

N_{Pe} = Peclet number = $U_\infty d_{b1} / D_1$

N_{Re} = Reynolds number = $d_{vs} U_\infty \rho_L / \mu_L$

N_{Sc} = Schmidt number = ν_L / D_L

N_{St} = Stanton number ในสมการ 20

N_W = Weissenberg number = $\lambda U_\infty / d_{b1}$

n' = กำลังปฏิกิริยา (reaction order) ของสาร B

P = ความดัน

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

R_A = อัตราปริมาณ A ที่ทำปฏิกิริยา

T = อุณหภูมิ

U_G = ความเร็วไหลผ่าน (superficial velocity) ของก๊าซ

U_L = ความเร็วไหลผ่าน (superficial velocity) ของของเหลว

U_∞ = ความเร็วกระแสอิสระ (free stream velocity)

ν_L = ปริมาตรของของเหลว

X = ค่าเปลี่ยนแปลงของสถานะก๊าซ (conversion of gas phase)

Z = จำนวนโมลของสารทำปฏิกิริยาในของเหลวที่ทำปฏิกิริยากับหนึ่งโมลของก๊าซที่ถูกละลาย

$\dot{\gamma}$ = อัตราเฉือน (shear rate)

R_a' = อัตราการเกิด

- $\dot{\gamma}_{av}$ = อัตราเฉือนเฉลี่ย (average shear rate)
 ρ_G = ความหนาแน่นของก๊าซ
 ρ_L = ความหนาแน่นของของเหลว
 σ = แรงตึงผิว (surface tension)
 τ = แรงเค้นเฉือน (shear stress)
 μ_a = ความหนืดปรากฏ (apparent viscosity)
 T = gas phase residence time
 α = อัตราส่วนการเกิดคาร์บอนเตต
 β = พารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless parameter) ในสมการ 39
 β_c = อัตราส่วนบัฟเฟอร์ (buffer ratio)
 Γ = อัตราส่วน C_b / C^* (ratio of C_b / C^*)
 ν_A = kinematic viscosity
 ϵ = ปริมาณก๊าซค้าง (gas hold up)
 λ = relaxation time

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

เรืออากาศโทศรีศกดิ์ ทรงวัชรกุล เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ.
2497 ที่จังหวัดตรัง จบปริญญาตรีเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปี พ.ศ. 2520 ปัจจุบันอยู่บ้านเลขที่ 3/147 ถนนพหลโยธิน บางเขน
กรุงเทพฯ รับราชการที่กรมสรรพาวุธทหารอากาศ คอนเมือง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย