

เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials, Procedures for Testing Soils, ASTM, Philadelphia, Pa. 1964.
- Arunyanak, N. 1978. "Lime-Cement Stabilization on Nong Ngoo Hao Clay". Thesis, Department of Civil Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok.
- Clare, K.E., and Cruchley, A.E. "Laboratory Experiments in the Stabilization of Clays with Hydrated Lime". Geotechnique, Vol. 7, pp. 97-111., 1957.
- Cooper, L.H.N., "Factors Affecting the Distribution of Silicate in the North Atlantic Ocean and the Formation of North Atlantic Deep Water", Journal Marine Biological Assn., Combridge University Press, London, England, Vol. 30., pp. 511-526, 1952.
- Correns, C.W., "The Experimental Chemical Weathering of Silicates", Clay Minerals Bullentin, Vol. 4, No. 26, 1961.
- Davidson, D.T., and Handy, R.L., "Lime and Lime-Pozzolan Stabilization", Highway Engineering Handbook, pp. 21-98, New York: The McGraw-Hill Book Company, 1960.
- Diamond, S., and Kinter, E.F., "Mechanism of Soil-Lime Stabilization, An Interpreting Reviews", Highway Research Record No. 92, Washington, D.C.: National Academy of Sciences/National Research Council, 1965.
- Diamond, S., White, J.L., and Dolch, W.L., "Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack", Proceedings, 12th National Conference on Clays and Clay Minerals. New York: Pergamon Press, 1964.
- Eades, J.L. "Reactions of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with Clay Minerals in Soil Stabilization", Unpublished Ph.D. Descertation, University of Illinois, 1962.

- Eades, J.L., and Grim, R.E. "Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization", Highway Research Board Bullentin No. 262. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1962.
- Eades, J.L., Nichols, F.P., Jr., and Grim, R.E. "Formation of New Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiments in Virginia", HRB Bullentin No. 335. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1962.
- Glenn, G.R., and Handy, R.L. "Lime-Clay Mineral Reaction Products", HRR No. 29. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1963.
- Goldberg, I., and Klein, A. "Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide", Special Technical Publication No. 142., Symposium on Exchange Phenomena in Soils. Philadelphia:ASTM, 1952
- Grim, R.E. Clay Mineralogy. New York:The Mc-Graw-Hill Book Company, 1963.
- Grim, R.E. Applied Clay Mineralogy. New York:The Mcgraw-Hill Book Company, 1962.
- Grim, R.E. Clay Mineralogy, 2nd ed. New York:The McGraw-Hill Book Company, 1968.
- Herrin, M., and Mitchell, H. "Lime-Soil Mixtures", HRB Bullentin No. 304. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1961.
- Herzog, A., and Mitchell, J.K. "Reactions Accompanying the Stabilization of Clay with Cement", HRR 36. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1963.
- Hilt, G.H. and Davidson, D.T. "Isolation and Investigation of a Lime-Montmorillonite Crystalline Reaction Product", HRB. Bullentin No. 304. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1961.

- Iler, R.K., "The Colloid Chemistry of Silica and Silicates", Ithaca, New York: Cornell University Press, 1955.
- Jambor, J. "Reaction Between Phase Composition, Over all Porosity, and Strength of Hardened Lime-Pozzolana Pastes", Mag. Concr. Res., Vol. 15, pp. 131-142, 1963.
- Jan, M.A., and Walker, R.D. "Effect of Lime, Moisture, and Compaction on a Clay Soil", HRR No. 29, pp. 1-12., 1963.
- Krauskopf, Konrad B., "The Geochemistry of Silica in Sedimentary Environments", Special Publication No. 7, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1959.
- Laguros, I.G., et al., "Evaluation of Lime for Stabilization of Loess", Proceedings of ASTM, Vol. 56, 1956.
- Leonards, G.A. Foundation Engineering. New York:Mc-Graw-Hill, 1962.
- Lu, L.W., et al., "The Calcium-Magnesium Ratio in Soil-Lime Stabilization", Proceedings, HRB, Vol. 36. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1957.
- Lund, O.L., and Ramsey, W.J. "Experimental Lime Stabilization in Nebraska", HRB Bull, 231, pp. 24-59., 1959.
- Mitchell, J.K., and Hooper, D.R. "Influence of Time Between Mixing and Compaction on Properties of a Lime-Stabilized Expansive Clay", HRB Bull. 304, pp. 14-31., 1961.
- Remus, M.D., and Davidson, D.T. "Relation of Strength to Compaction and Density of Lime-Treated Soils", HRB Bull. 304. Washington, D.C.: National Academy of Sciences/National Research Council, 1961.
- Ruff, C.G., and Clara Ho, "Time-Temperature Strength-Reaction Product Relationships in Lime-Bentonite-Water Mixtures", HRR Bullentin No. 139, pp. 42-59., 1966.

- Taylor, W.H., Jr., and Arman, A. "Lime Stabilization Using Preconditioned Soils", HRB Bullentin No. 262, pp. 1-19., 1960.
- Thompson, M.R., "The Significance of Soil Properties in Lime-Soil Stabilization", Civil Engineering Studies, Highway Engineering Series No. 13, Illinois Cooperative Highway Research Program Series No. 23. Urbana, Illinois.:Department of Civil Engineering, University of Illinois, 1964.
- Thompson, M.R., "Lime-Reactivity of Illinois Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 92, No. SM5, September, 1966.
- Wang, J.W., et al. "Comparison of Various Commercial Limes for Soil Stabilization", HRB Bullentin No. 335. Washington, D.C.:National Academy of Sciences/National Research Council, 1962.
- Wang, J.W., "Role of Magnesium Oxide in Soil-Lime Stabilization", HRB Spec. Rept. 90, p. 175, 1966.
- Whitehurst, E.A., and Yoder, E.J., "Durability Tests on Lime-Stabilized Soils", HRB Proc., 31:529, 1952.
- Wiklander, L., "Cation and Anion Exchange", Chemistry of the Soil, Edited by F.E. Bear, Reinhold Publishing Corp., New York, 1955.
- Woods, K.B., and Yoder, E.J., "Stabilization with Soil, Lime or Calcium Chloride as an Admixture", Proc. Conf. on Soil Stabilization, M.I.T., pp. 3-19., 1952.
- Zolkov, E., "Influence of Chlorides and Hydroxides of Calcium and Sodium on Consistency Limits of a Fat Clay", HRB Bullentin No. 309, pp. 109-115., 1962.

ภาคผนวก

- ก. Double layer theory
- ข. การวิเคราะห์โดย X-ray diffraction
- ค. Differential Thermal Analysis (DTA)
- ง. ตัวอย่างในการวิเคราะห์ทางด้านแร่และข้อมูลในการทดลอง

ภาคผนวก ก

Double layer theory

การใช้สมการทางคณิตศาสตร์อธิบายเกี่ยวกับวงน้ำ double layer รอบอนุภาคดินเหนียวนั้นได้มีการกำหนดสมมุติฐานเพื่อใช้ในการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกโดยการกำหนดให้ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นแผ่นเรียบและกรณีหลังจะเป็นรูปทรงกลม ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นแผ่นเรียบเท่านั้น (1-มิติ) โดยมีสมมุติฐานที่ใช้ในการอธิบายดังนี้

1. อีออนในวงน้ำ double layer ถือเป็นจุดของประจุโดยแต่ละอีออนจะไม่มีแรงกระทำต่อกัน
2. ประจุบนผิวของอนุภาคจะแผ่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ
3. ผิวของอนุภาคจะเป็นแผ่นเรียบที่มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับความหนาของวงน้ำ double layer
4. Static dielectric constant ของตัวกลางจะไม่ขึ้นกับทิศทาง

ดังนั้นความเข้มข้นของอีออนชนิด i คือ n_i ในสนามของแรง เมื่อสมมูลย์ความสมการของ Boltzmann คือ

$$n_{i0} \exp\left(\frac{E_{i0} - E_i}{kT}\right) \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อสัญลักษณ์ ϕ แทนจุดอ้างอิง E เป็นพลังงานศักย์ T เป็นอุณหภูมิ (องศาเคลวิน) และ k เป็นค่าคงที่ Boltzmann (1.38×10^{-16} เอิกซ์/°เคลวิน) ความเข้มข้น n_i และ n_{i0} มีหน่วยเป็น อีออน/ลูกบาศก์เซนติเมตร

สำหรับอีออน ที่อยู่ในสนามไฟฟ้าจะมีพลังงานศักย์ดังนี้

$$E_i = v_i e\psi \dots\dots\dots (2)$$

โดยที่ v_i เป็น ionic valance

e เป็นหน่วยประจุ (16.0×10^{-20} คูลอมบ์หรือ 4.8×10^{-10} esu)

ψ เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (electric potential) ที่จุดนั้น

ความต่างศักย์ (Potential) นี้จะแปรเปลี่ยนตามระยะทางจากประจุบนผิวของอนุภาคดังแสดงในรูป ก.1 ในดินเหนียว ψ จะมีค่าเป็นลบเพราะว่าบนผิวของอนุภาคมีประจุลบ E_{io} จะมีค่าเป็น 0 เมื่ออยู่ห่างจากผิวของอนุภาคมาก

$$E_{io} - E_i = -v_i e \psi$$

$$n_i = n_{io} \exp\left(\frac{-v_i e \psi}{kT}\right) \dots\dots\dots (3)$$

สมการ (3) แสดงถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นกับความต่างศักย์ ซึ่งผลของความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงตามรูปที่ ก.2 สำหรับอนุภาคดินเหนียวที่มีประจุลบ $n_i^+ > n_{io}$ และ $n_i^- < n_{io}$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ประจุและระยะทางแสดงโดยสมการของ Poisson ดังนี้

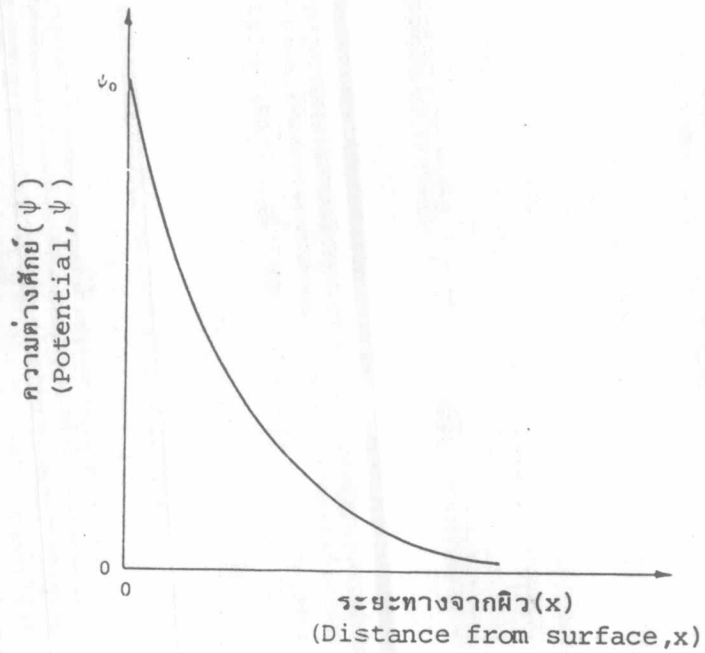
$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{-4\pi \rho}{D} \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ x เป็นระยะทางจากผิวของอนุภาค ρ เป็นความหนาแน่นของประจุและ D เป็น dielectric constant ความหนาแน่นของประจุในวงน้ำ double layer จะมิอยู่โดยผลของออสอน จนกระทั่ง

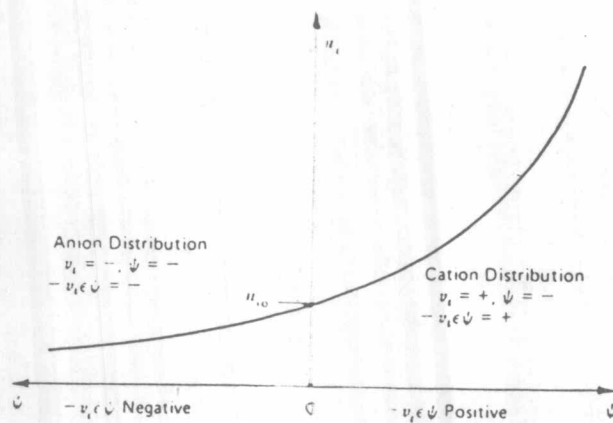
$$\rho = e \sum v_i n_i \dots\dots\dots (5)$$

แทนค่า n_i จากสมการ (3)

$$\rho = e \sum v_i n_{io} e^{(-v_i e \psi / kT)} \dots\dots\dots (6)$$



รูปที่ ก.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (electric potential) กับระยะทางจากผิวของประจุ (Mitchell, 1976)



รูปที่ ก.2 แสดงความเข้มข้นของประจุในสนามความต่างศักย์ ตามสมการของ Boltzmann (Mitchell, 1976)

จากสมการ (4) จะได้

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-4\pi e}{D} \sum_i v_i n_{i0} e^{(-v_i e\psi/kT)} \dots\dots\dots (7)$$

ในกรณีที่มีประจุบวกและประจุลบที่มี valance เท่ากันอย่างละตัวคือ $i = 2$

$$|v_+| = |v_-| \equiv v, \quad n_0^+ = n_0^- \equiv n_0$$

สมการ (7) แปลงให้เป็นสมการ Poisson-Boltzmann ได้เป็น

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{8\pi n_0 v e}{D} \sinh \frac{ve\psi}{kT} \dots\dots\dots (8)$$

วงน้ำ double layer เมื่ออยู่ตามลำหึ่ง (Single double layer)

กำหนดให้

$$y = \frac{ve\psi}{kT}$$

$$z = \frac{ve\psi_0}{kT} \dots\dots\dots (9)$$

และ $\xi = Kx$

$$\text{เมื่อ } K^2 = \frac{8\pi n_0 e^2 v^2}{DkT} \text{ (cm}^{-2}\text{)} \dots\dots\dots (10)$$

ดังนั้นสมการ (8) จะเป็น

$$\frac{d^2y}{d^2\xi} = \sinh y \dots\dots\dots (11)$$

boundary condition สำหรับการอินทิเกรตครั้งแรกคือ $\xi = \infty, y = 0$ และ

$dy/d\xi = 0$ ดังนั้น

$$\frac{dy}{d\xi} = -2 \sinh \left(\frac{y}{2}\right) \dots\dots\dots (12)$$

boundary condition สำหรับการอินทิเกรตครั้งที่สองคือ $\xi = 0,$

$$y = Z(\psi = \psi_0)$$

$$e^{y/2} = \frac{e^{z/2} + 1 + (e^{z/2} - 1) e^{-\xi}}{e^{z/2} + 1 - (e^{z/2} - 1) e^{-\xi}} \dots\dots\dots (13)$$

สมการ (13) อธิบายถึงการสลายตัวของแบบเอ็กโพเนนเชียลของความต่างศักย์กับระยะทางจากผิวของอนุภาค ในกรณีที่ความต่างศักย์ที่ผิวของอนุภาคมีค่าน้อย (มีค่าน้อยกว่า 25 mV) $e\psi/kT \ll 1$ ดังนั้นสมการ (8) จะมีค่าโดยประมาณดังนี้คือ

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = K^2\psi \dots\dots\dots (14)$$

เมื่อ

$$\psi = \psi_0 e^{-Kx} \dots\dots\dots (15)$$

และความต่างศักย์จะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลกับระยะทาง ในกรณีที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของ diffuse charge อยู่ที่ระยะ $x = 1/K$ จากผิวของอนุภาค ดังนั้นระยะ $1/K$ จะเป็นความหนาของวงน้ำ double layer

ประจุของวงน้ำ double layer

$$\sigma = \int_0^\infty \rho dx \dots\dots\dots (16)$$

จากสมการของ Poisson จะได้

$$\sigma = \frac{D}{4\pi} \int_0^\infty \frac{d^2\psi}{dx^2} dx = \frac{-D}{4\pi} \left(\frac{d\psi}{dx} \right)_{x=0} \dots\dots\dots (17)$$

ความลาดของฟังก์ชันความต่างศักย์ที่ผิวของอนุภาค $(d\psi/dx)_{x=0}$ จากสมการ (12) จะทำให้ได้

$$\sigma = \left(\frac{2n_0 DkT}{\pi} \right)^{1/2} \sinh \frac{z}{2} \dots\dots\dots (18)$$

$$\sigma = \left(\frac{DK}{4\pi} \right) \psi_0 \dots\dots\dots (19)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่เป็นแบบง่ายกว่าสมการ (13) สามารถทำได้ (Bolt, 1955a) โดยเลือกจุดที่เป็น 0 ของแกน ξ บน imaginary plane ระยะ x_0 ซึ่งอยู่ข้างหลัง true surface ที่ซึ่งความต่างศักย์มีค่าเข้าสู่นันต์ ดังรูปที่ ก.3

$$\exp(-y) = \frac{\cos h\xi + 1}{\cos h\xi - 1} = \cot^2 h \left(\frac{\xi}{2} \right) \dots\dots\dots (20)$$

$$\xi_0 = Kx = \frac{4vc_0}{KT} \dots\dots\dots (21)$$

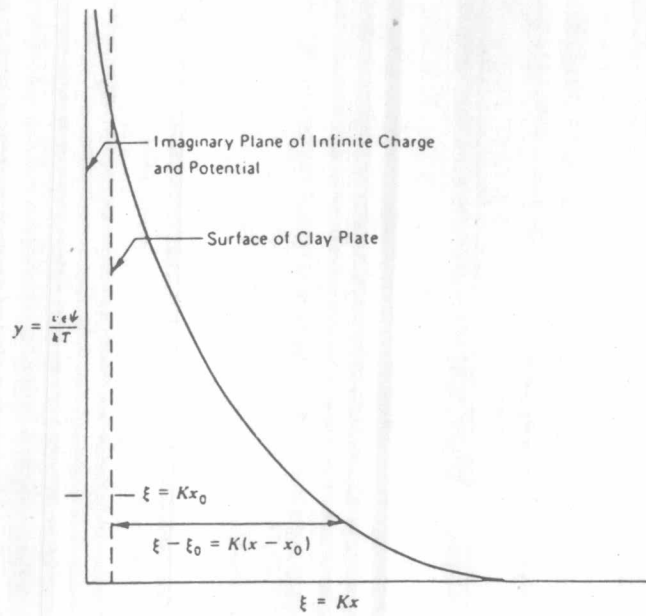
เมื่อ c_0 เป็นความเข้มข้นที่ระยะไกลมาจากผิวของอนุภาคมีหน่วยเป็น $m \text{ mole/cm}^2$ (เท่ากับ $1000 n_0/N$ เมื่อ N เป็น Avogadro's number) และ τ เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวของอนุภาคมีหน่วยเป็น meq/cm^2 (Cation exchange Capacity/Specific Surface) ความสัมพันธ์ระหว่าง y และ ξ เป็นดังสมการ (20) ดังรูปที่ ก.4 ค่าโดยประมาณของสมการ (21) นั้นได้ผลดียกเว้นในกรณีที่ c_0 มีค่าสูงหรือว่า τ มีค่าต่ำมากคือ

$$x = \frac{4}{vB\tau} \dots\dots\dots (22)$$

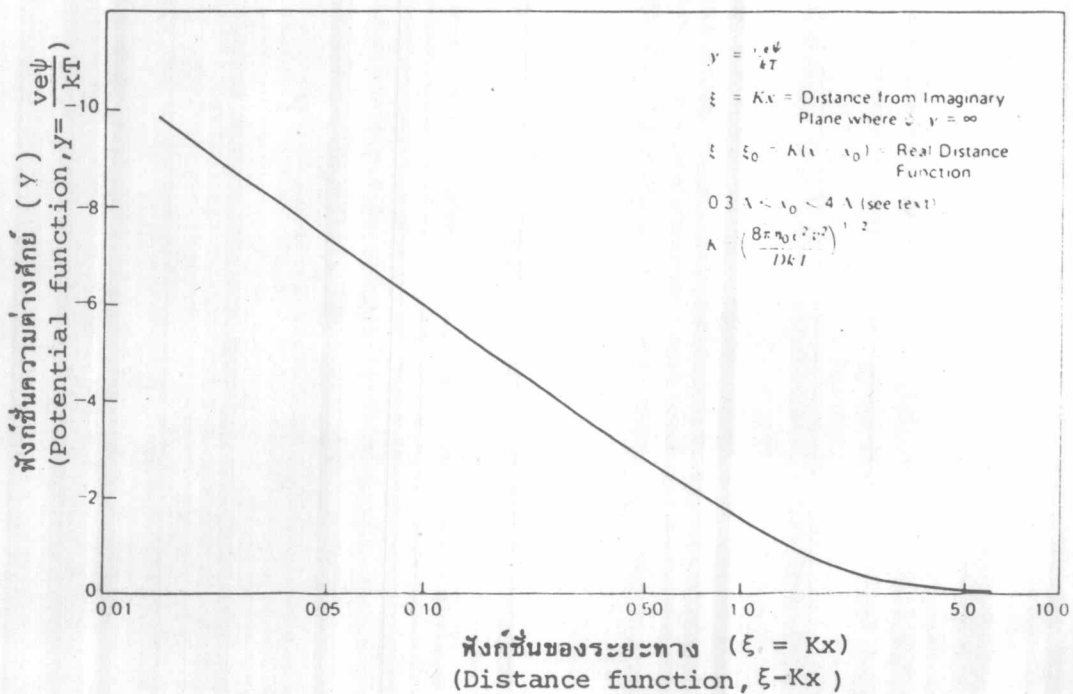
เมื่อ $B = 8F^2/1000 DRT \approx 1 \times 10^{15} \text{ cm/m mole}$ ที่อุณหภูมิ 20°C . F เป็นค่าคงที่ Faraday และ R เป็น gas constant (KN) Bolt (1956) ได้แนะนำว่าค่า x_0 สามารถประมาณได้โดยจะเท่ากับ $1/v A^\circ$ สำหรับเอซิลไลท์ $2/v A^\circ$ สำหรับคาโอลินไลท์ และ $4/v A^\circ$ สำหรับมอนท์โบริลโลไนท์

วงน้ำ double layer ที่มีผลต่อกัน (Interacting double layer)

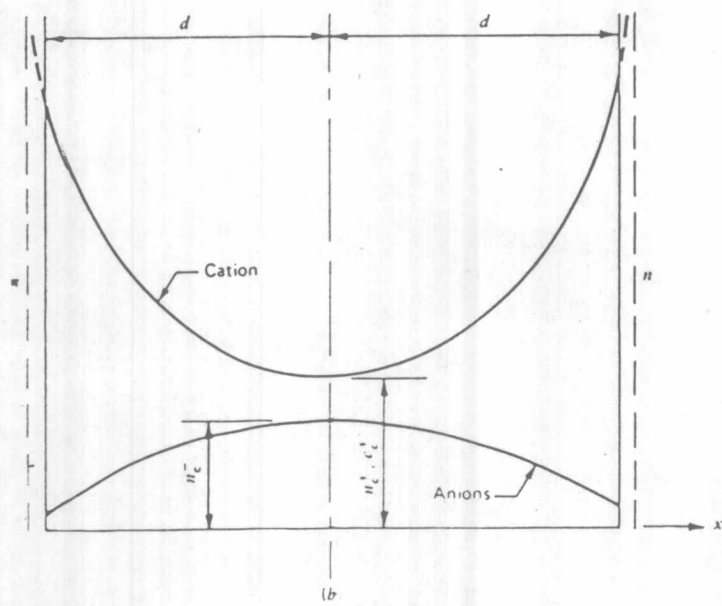
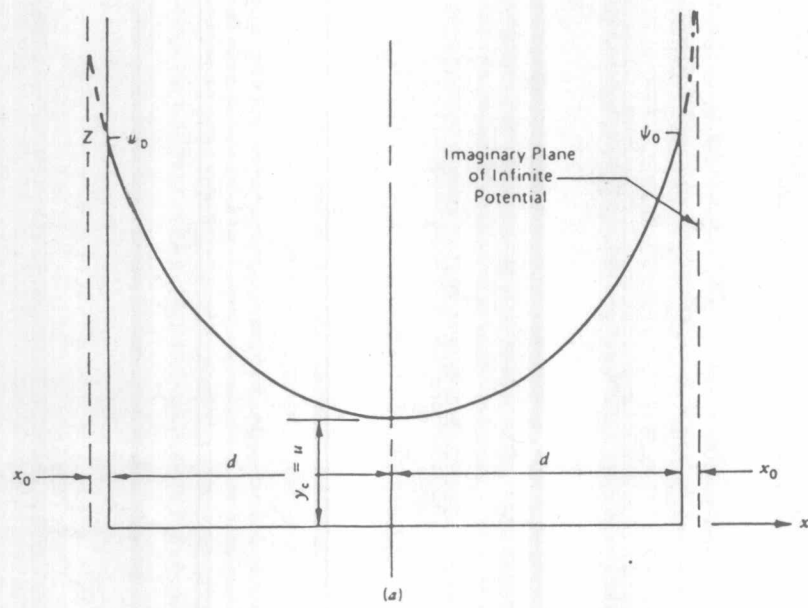
รูปที่ ก.5 แสดงถึงการกระจายของความต่างศักย์และประจุของวงน้ำ double layer จากสองอนุภาคที่มีผิวเป็นแผ่นเรียบขนานกันและห่างกันเป็นระยะ $2d$ พังก์ชันของความต่างศักย์ที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคทั้งสอง คือ $y = ve\psi d/kT$ แทนด้วยสัญลักษณ์ u โดย boundary condition ในการอินทิเกรตสมการ (11) คือ $\xi = Kd$, $y = u$ และ $dy/d\xi = 0$ ส่วน boundary condition ในการอินทิเกรตครั้งที่ 2 ใช้จากสมการ



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ใช้ในสมการที่ (20) (Mitchell,1976)



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันของความต่างศักย์กับฟังก์ชันของระยะทางของวงน้ำ double layer ที่อยู่ตามลำหึ่ง (Mitchell,1976)



รูปที่ ก.5 การกระจายของความต่างศักย์และประจุของวงน้ำ double layer ที่กระทำต่อกัน เมื่ออนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบและ เรียงตัวขนานกันโดย (a) เป็นการกระจายของความต่างศักย์ (b) เป็นการกระจายของประจุ (Mitchell, 1976)

(12) จะได้

$$\int_0^u (2 \cosh y - 2 \cosh u)^{-1/2} dy = \int_0^d d \xi = - Kd \dots\dots (23)$$

การอินทิเกรตสมการ (23) สามารถใช้ตารางที่ให้ค่าความต่างศักย์ที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคดินเหนียวทั้ง 2 (จากค่า u) ซึ่งให้ค่าโดย Verwey และ Overbeek (1948) ส่วนในสภาวะที่ประจุที่ผิวของอนุภาคคงที่นั้นดูตารางของ Van Olphen (1963)

ในกรณีที่วงน้ำ double layer ใกล้กันจะมีปฏิกิริยาต่อต้านเล็กน้อยคือมีค่า Kd สูง หรือในกรณีที่ผิวของอนุภาคอยู่ห่างกัน มี u สูง v สูงหรือค่า ψ_0 ค่า ดังนั้นความต่างศักย์ที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาค 2 อนุภาคจะเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ของวงน้ำ double layer ที่มีระยะห่าง d เพียงตัวเดียว

$$u = 2yd \dots\dots\dots (24)$$

ความเข้มข้นของไอออนที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคดินเหนียวหาจากสมการของ Boltzmann คือ

$$n^- = n_0 e^u \quad n^+ = n_0 e^{-u} \dots\dots\dots (25)$$

อีกวิธีในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไอออนที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาค C_c จะตามสมการของ Bolt (1956) คือ

$$v(\beta C_0)^{1/2} (x_0 + d) = 2 \left(\frac{C_0}{C_c}\right)^{1/2} \int_{\phi=0}^{\pi/2} \frac{d\phi}{(1 - (C_0/C_c)^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (26)$$

ผลของ electrolyte concentration

เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของวงน้ำ double layer โดยจะแปรตามความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่นเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนจาก $0.83 \times 10^{-4} M$ NaCl ไปเป็น $0.83 \times 10^{-2} M$ NaCl มีน้ำเป็นตัวทำละลาย n_0 เป็น molarity $N \times 10^{-3} \text{ ions/cm}^3$ ซึ่งเท่ากับ $6.02 \times 10^{20} M^{-1} \text{ ions/cm}^3$ kT

เท่ากับ 0.4×10^{-13} เอิกซ์ที่อุณหภูมิ 290° เคลวิน (17° ซ.) สำหรับ 0.83×10^{-4} M NaCl

$$n_o = 5.0 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^3$$

$$K^2 = \frac{8\pi n_o e^2 v^2}{DkT} = \frac{8\pi \times 5.0 \times 10^{16} \times (4.8 \times 10^{-10})^2 \times 1^2}{80 \times 0.4 \times 10^{-13}}$$

$$= 9.0 \times 10^{10}$$

$$K = 3.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{1}{K} = \text{ความหนาของวงน้ำ double layer} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ cm.}$$

$$= 333 \text{ \AA}$$

สำหรับ 0.83×10^{-2} M NaCl

$$n_o = 5.0 \times 10^{18} \text{ ions/cm}^3$$

$$K = 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{1}{K} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

$$= 33.3 \text{ \AA}$$

จากสมการ (18) ความต่างศักย์ที่ผิว

$$\sigma = \left(\frac{2n_o DkT}{\epsilon} \right) \sinh \left(\frac{Z}{2} \right)$$

$$\sinh \left(\frac{Z}{2} \right) = 3.0 \times 10^4 \left(\frac{\epsilon}{2n_o \times 80 \times 0.4 \times 10^{-13}} \right)^{1/2}$$

$$= \frac{3.0 \times 10^4}{(n_o)^{1/2}} (49.1 \times 10^{10})^{1/2}$$

$$= \frac{2.10 \times 10^{10}}{(n_o)^{1/2}}$$

สำหรับ 0.83×10^{-4} M NaCl

$$\sinh\left(\frac{Z}{2}\right) = \frac{2.10 \times 10^{10}}{(5.0 \times 10^{16})^{1/2}} = \frac{2.10 \times 10^{10}}{2.23 \times 10^8}$$

$$= 0.94 \times 10^2 = 94$$

$$\frac{Z}{2} = \frac{ve\psi_0}{2kT} = 5.235$$

$$Z = 10.47$$

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \frac{kTZ}{ve} = \frac{0.4 \times 10^{-13}}{1 \times 4.80 \times 10^{10}} \times 300 \times 10^3 \times 10.47 \\ &= 262 \text{ mV} \end{aligned}$$

สำหรับค่า 0.83×10^{-2} M NaCl คือ

$$\sinh\left(\frac{Z}{2}\right) = 9.4$$

$$\frac{Z}{2} = 2.937$$

$$Z = 5.874$$

$$\psi_0 = 147 \text{ m.}$$

การลดลงของความต่างศักย์กับระยะทางจากผิวของอนุภาคหาค่าจากสมการ (20)

และ (21)

$$\exp(-y) = \frac{\cosh \xi + 1}{\cosh \xi - 1} = \coth^2\left(\frac{\xi}{2}\right) \dots\dots\dots (20)$$

$$\xi_0 = Kx_0 = \frac{4vC_0}{K\tau} \dots\dots\dots (21)$$

จากรูปที่ ก.4 สำหรับ $0.83 \times 10^{-4} \text{ M NaCl} = 0.83 \times 10^{-4} \text{ m mole/cm}^3$

$$K = 3.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

$$X_o = \frac{4 \times 1 \times 0.83 \times 10^{-4}}{(3.0 \times 10^5)^2 \times 0.1035 \times 10^{-6}}$$

$$= 3.5 \times 10^{-8} \text{ cm} \approx 4 \text{ \AA}$$



ค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ ก.6, ก.7, ก.8 และ ก.9

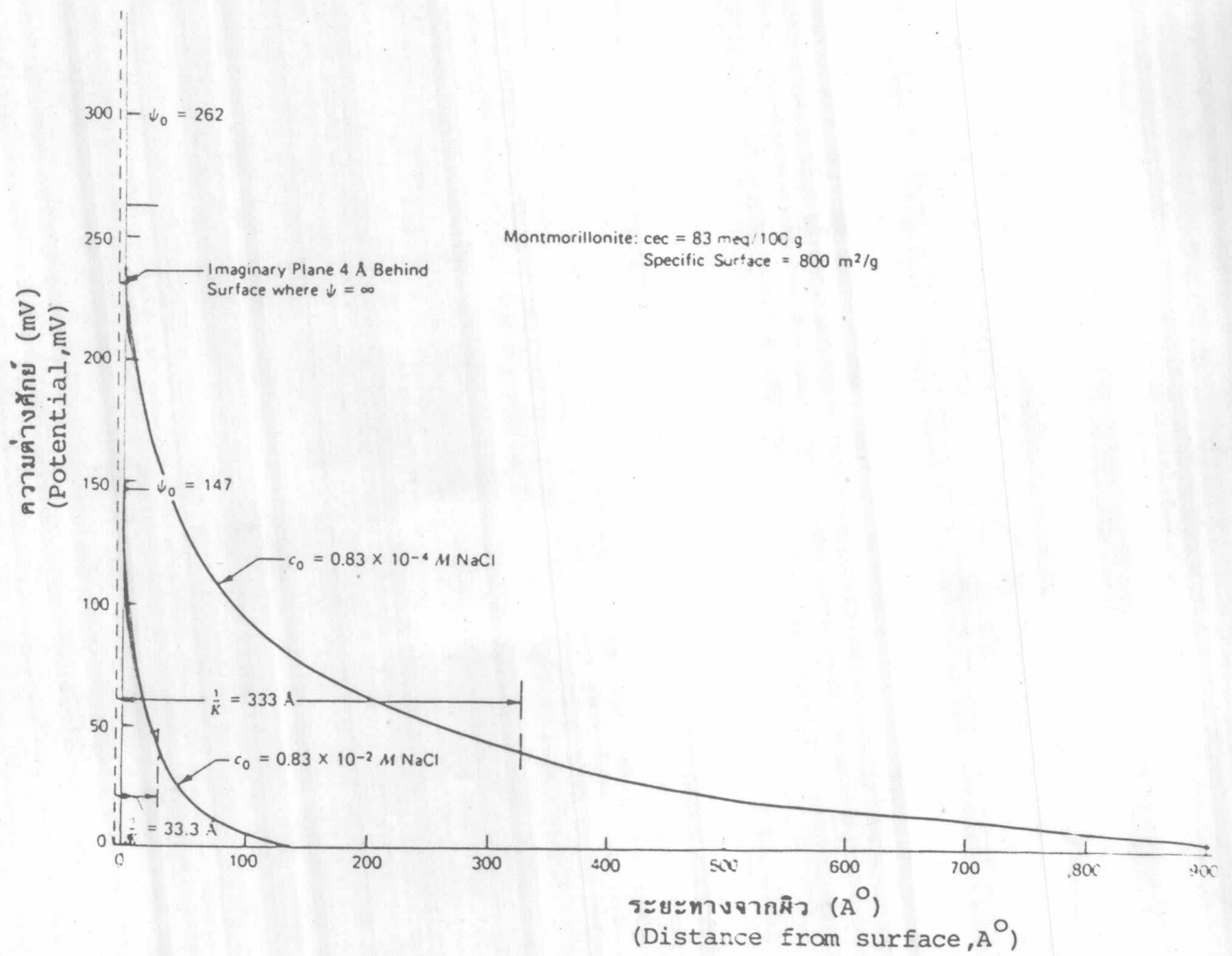
ผลของ cation valence

สำหรับสารละลายที่มี molarity เดียวกันและมีประจุที่ผิวของอนุภาคคงที่ เมื่อ cation valence เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อความต่างศักย์ที่ผิว และความหนาของวงน้ำ double layer ค่าฟังก์ชันของความต่างศักย์ที่ผิว (Z) ซึ่งคำนวณจากสมการ (18) จะไม่ขึ้นกับค่า valence

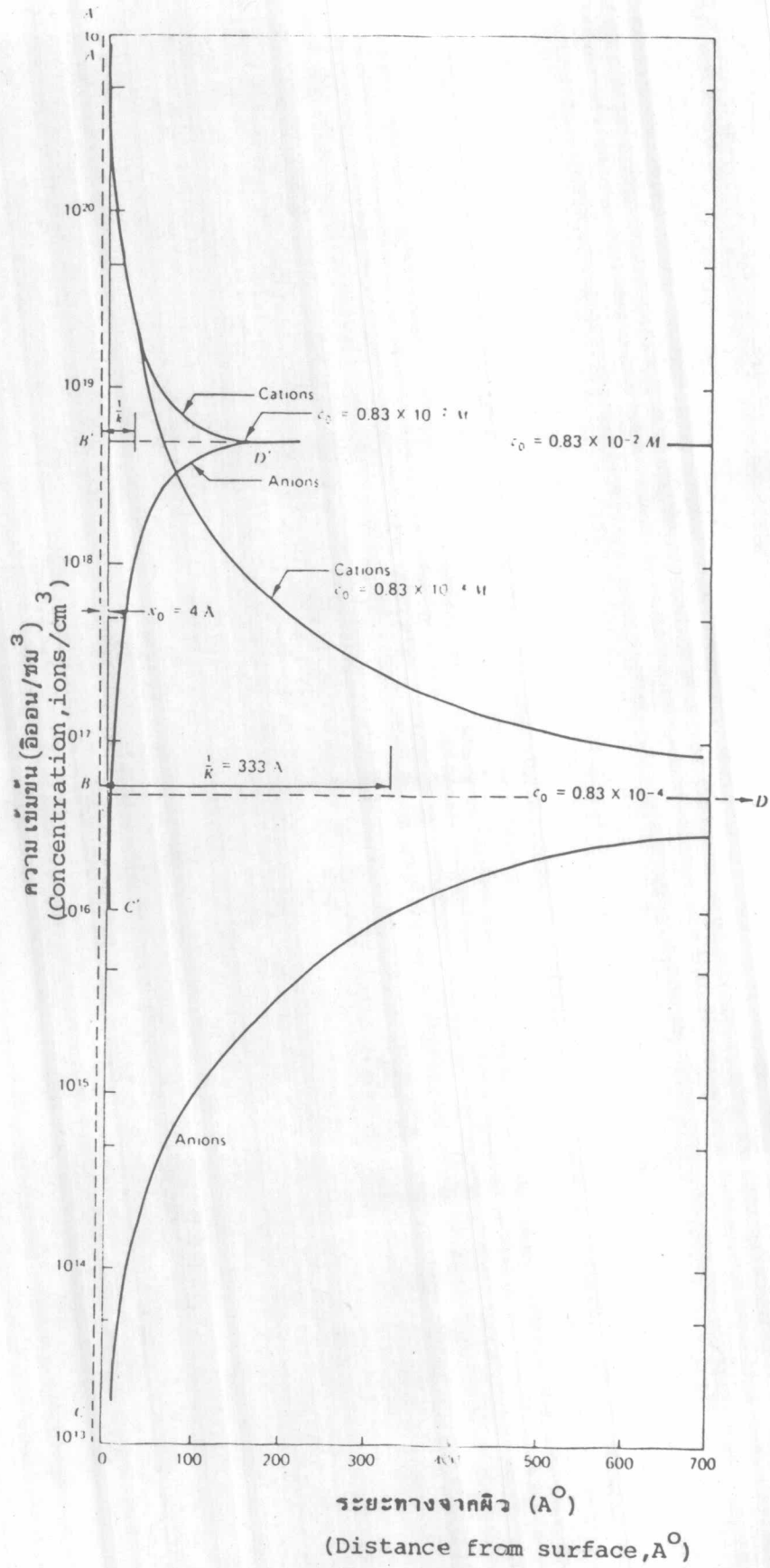
ตัวอย่างที่นำมาพิจารณาคือเมื่อ $0.83 \times 10^{-4} \text{ M NaCl}$ และ CaCl_2 , $n = 5 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^3$ จะได้ค่า Z จากตัวอย่างการคำนวณที่แล้ว เนื่องจาก ψ_o เป็นสัดส่วนกลับกับ v ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่ผิวของสารละลาย CaCl_2 จะเป็นครึ่งหนึ่งของสารละลาย NaCl นั่นคือ $(\psi_o)_{\text{Na}} = 262 \text{ mV}$, $(\psi_o)_{\text{Ca}} = 131 \text{ mV}$ ผลของ valence ต่อความหนาของวงน้ำ double layer สังเกตได้จากผลของ $1/K$ จากสมการ (10)

$$\frac{1}{K} \propto \frac{1}{v}$$

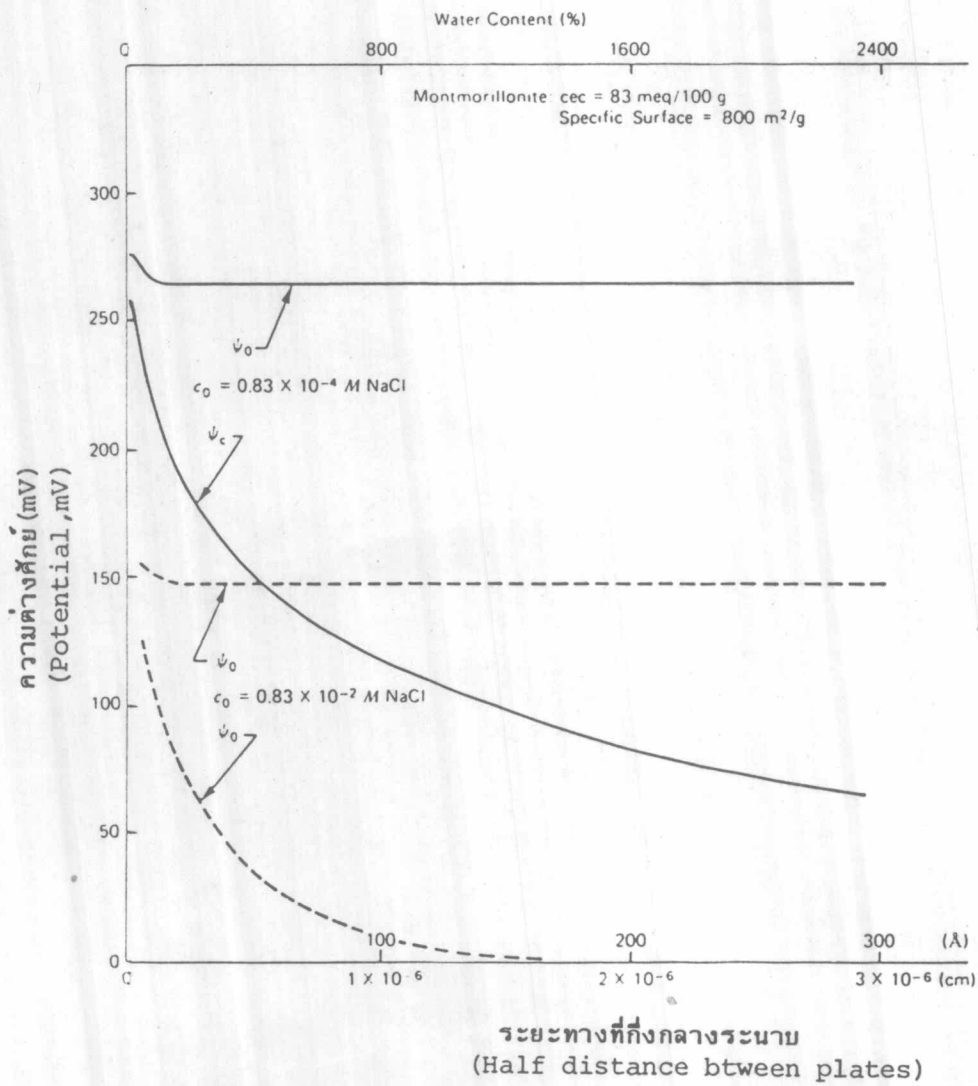
การกระจายของ Na^+ และ Ca^{2+} แสดงในรูป ก.10 สรุปได้ว่าเมื่อ valence เพิ่มขึ้นจะลดความเข้มข้นที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคและความต่างศักย์เป็นการลดแรงผลักระหว่างอนุภาค



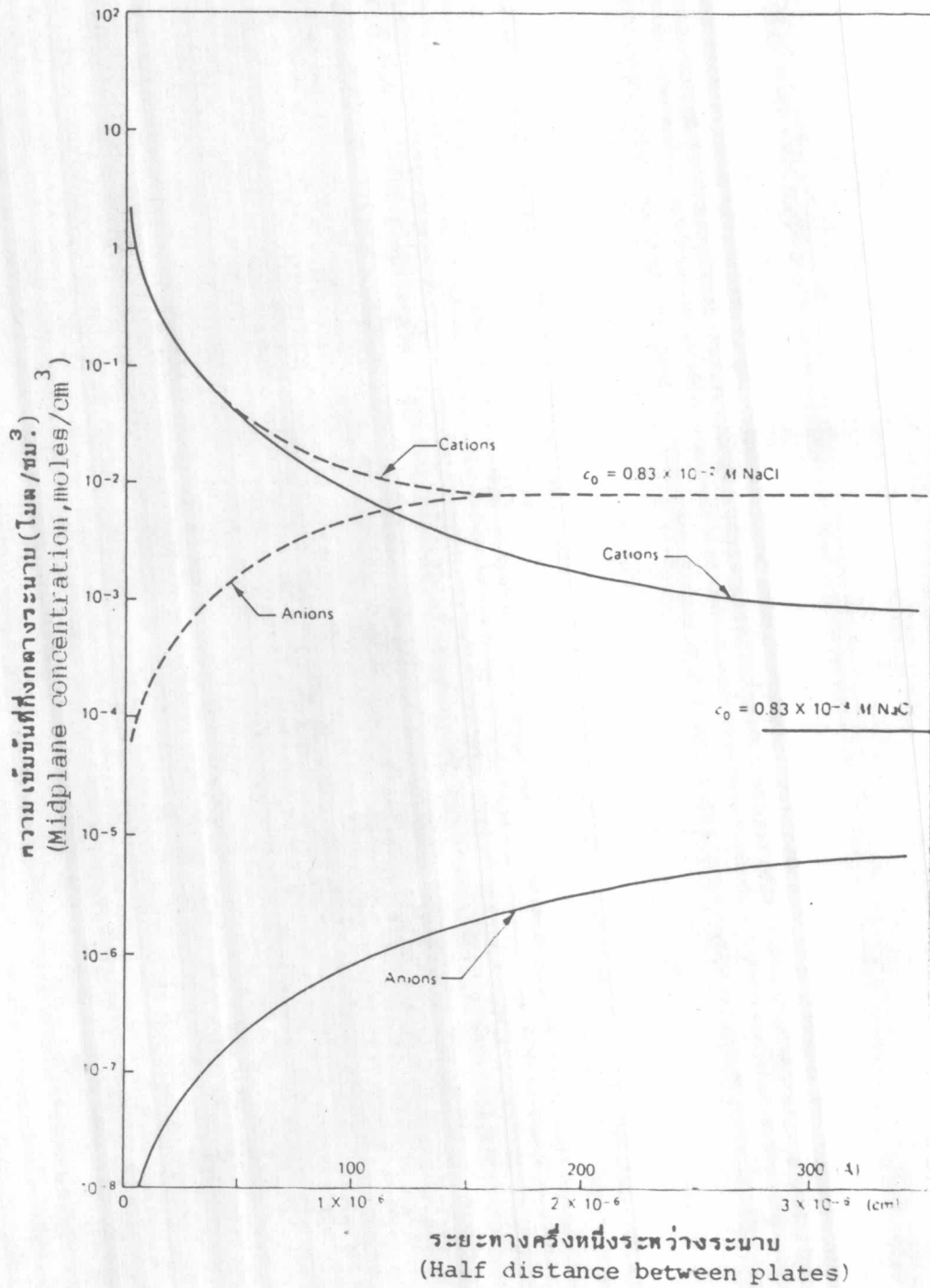
รูปที่ ก.6 ผลของความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความต่างศักย์ของวงน้ำ double layer (Mitchell, 1976)



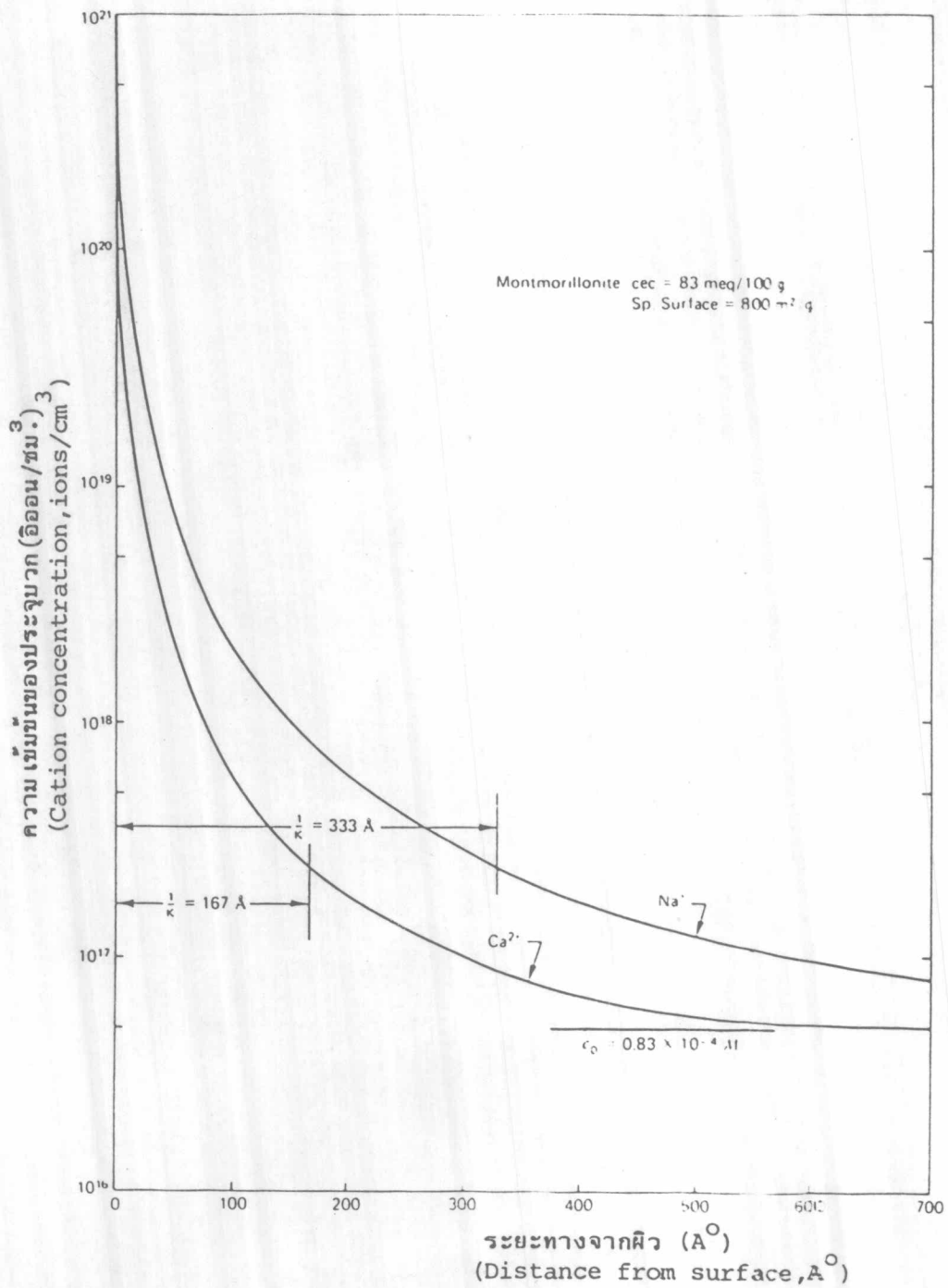
รูปที่ ก.7 ผลของความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อการกระจายของไอออนในวงน้ำ Double layer (Mitchell, 1976)



รูปที่ ก.8 ผลของความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความต่างศักย์ที่ผิวและที่กึ่งกลางระนาบของดิน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบและเรียงตัวขนานกัน (Mitchell, 1976)



รูปที่ ก.๑ ผลของความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความเข้มข้นที่กึ่งกลางระนาบของดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นและเรียงตัวขนานกัน (Mitchell, 1976)



รูปที่ ก.10 ผลของ cation valance ที่มีต่อความเข้มข้นของประจุบวกใน
วงน้ำ Double layer (Mitchell, 1976)

ภาคผนวก ข.

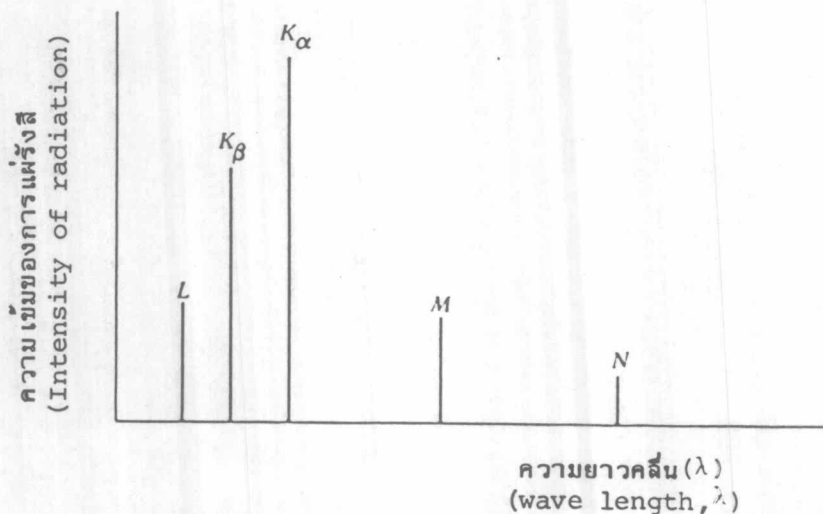
การวิเคราะห์โดย X-ray diffraction

X-ray diffraction เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ศึกษาส่วนประกอบของแร่ที่เป็นผลึก โดยรังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.01 ถึง 100 \AA รังสีเอ็กซ์เกิดจากการที่อิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งเข้าชนสารที่โซ่ทำเป้า ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์อันหนึ่งอันใดใน 2 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นคือ

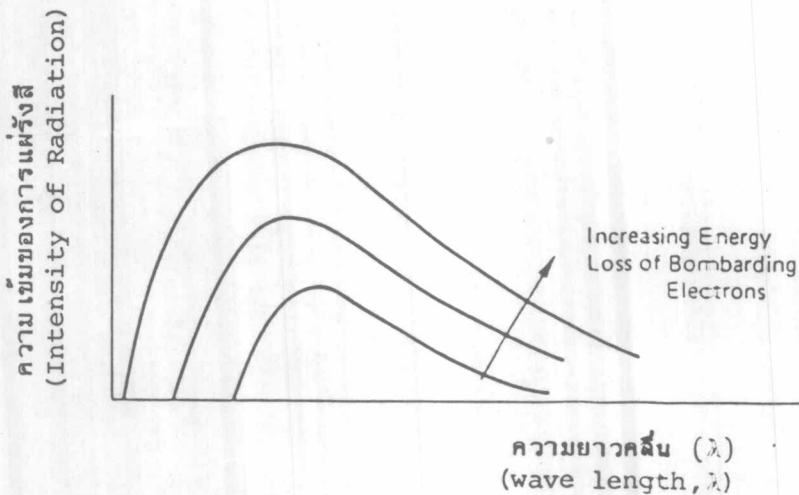
1. อิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งเข้าไปชนและแทนที่อิเล็กตรอนที่อยู่ shell ชั้นในของอะตอมหนึ่งในสารที่โซ่ทำเป้า ดังนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ shell ชั้นนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะลงมาแทนที่ จึงปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาเป็นรังสีเอ็กซ์ ส่วนความยาวคลื่นและความเข้มของการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของอะตอมของสารที่โซ่ทำเป้า แต่เนื่องจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้หลาย shell และการแทนที่ในแต่ละ shell จะให้คุณลักษณะของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสี (Intensity of radiation) กับความยาวคลื่นแสดงในรูปที่ ข.1

2. อิเล็กตรอนความเร็วสูงไม่ได้วิ่งเข้าไปชนอิเล็กตรอนในอะตอมของสารที่โซ่ทำเป้าโดยตรง เพียงแต่ความเร็วของอิเล็กตรอนช้าลงในสนามไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของอะตอม ดังนั้นพลังงานที่ลดลงจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนและโปรตอนของรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ที่เกิดโดยวิธีนี้คุณสมบัติจะไม่ขึ้นกับธรรมชาติของอะตอมที่ถูกชนคือจะให้ผลเป็นแถบของคลื่นคือ เนื่องจากมีความยาวคลื่นแปรเปลี่ยนไปดังรูปที่ ข.2

ผลรวมของรังสีเอ็กซ์จากปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้จะเป็นดังรูป ข.3 ในทางปฏิบัติแล้วรังสีเอ็กซ์จะถูกสังเคราะห์โดยโซ่หลอดที่มีขั้วหนึ่งสร้างอิเล็กตรอนและด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ $50,000$ โวลต์ทำให้เกิดลำอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนสารที่โซ่ทำเป้า รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นนี้จะใช้ curved crystal monochromator ทำให้มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวหรืออาจจะใช้สารซึ่งสามารถดูดซับรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นตัวกรองรังสีให้ได้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว ความยาวคลื่นของ monochromatic radiation จะขึ้นกับสารที่โซ่



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีและความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนใน shell ต่างๆ โดยตัวอักษรแสดงถึง shell ที่ถูกแทนที่



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดความเร็วของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

ทำเข้าโดยความยาวคลื่นจะเป็น 0.71 \AA เมื่อใช้โมลิบดีนัมทำเข้าจนถึง 2.29 \AA เมื่อใช้โครเมียมทำเข้า ส่วนทองแดงซึ่งเป็นสารที่ใช้กันมากในการวิเคราะห์แร่ดินเหนียวจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54 \AA

การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากความยาวคลื่นประมาณ 1 \AA นี้เป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับระยะห่างของ atomic plane ในสารที่มีโครงสร้างเป็นแบบผลึกทำให้รังสีเอ็กซ์มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก atomic plane กับรังสีเอ็กซ์จะมีพฤติกรรมต่อต้านคล้ายกับการสะท้อนของแสง กล่าวคือเมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบกับโครงสร้างผลึกรังสีเอ็กซ์จะทะลุเข้าไปในโครงสร้างผลึกหลายชั้น (layers) ก่อนที่จะถูกดูดซึม ที่แต่ละ atomic plane ล่า รังสีจะถูกดูดซึมโดยแต่ละอะตอมและจะเกิดการแกว่งเหมือนกับ dipole แล้วจะเกิดการแผ่รังสีในทุกทิศทาง การแผ่รังสีในทิศทางที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการซ้อนและเสริมกันของคลื่นและมีผลคล้ายการสะท้อนของคลื่นแสง รังสีเอ็กซ์ที่คลื่นเสริมกันนี้จะถูกดักจับด้วยฟิล์มหรือเครื่องมือวัดรังสี

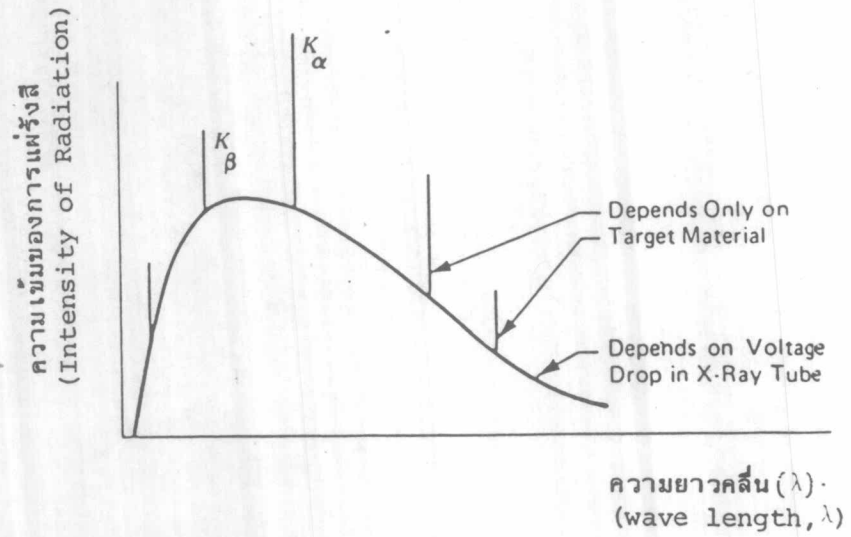
รูปที่ ข.4 แสดงลำรังสีที่ขนานกันของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น λ กระทบกับโครงสร้างผลึกทำมุม θ กับ atomic plane ที่ขนานและห่างกันเป็นระยะ d ถ้าการสะท้อนของคลื่นจากจุด C ไปเป็นคลื่นเสริมกับที่สะท้อนมาจาก A แล้วผลต่างของระยะทางของคลื่นทั้ง 2 นี้จะเท่ากับผลรวมของความยาวคลื่นคือ $n\lambda$ ผลต่างของระยะทางคือระยะ BC+CD

$$BC+CD = n\lambda \quad \dots\dots\dots(1)$$

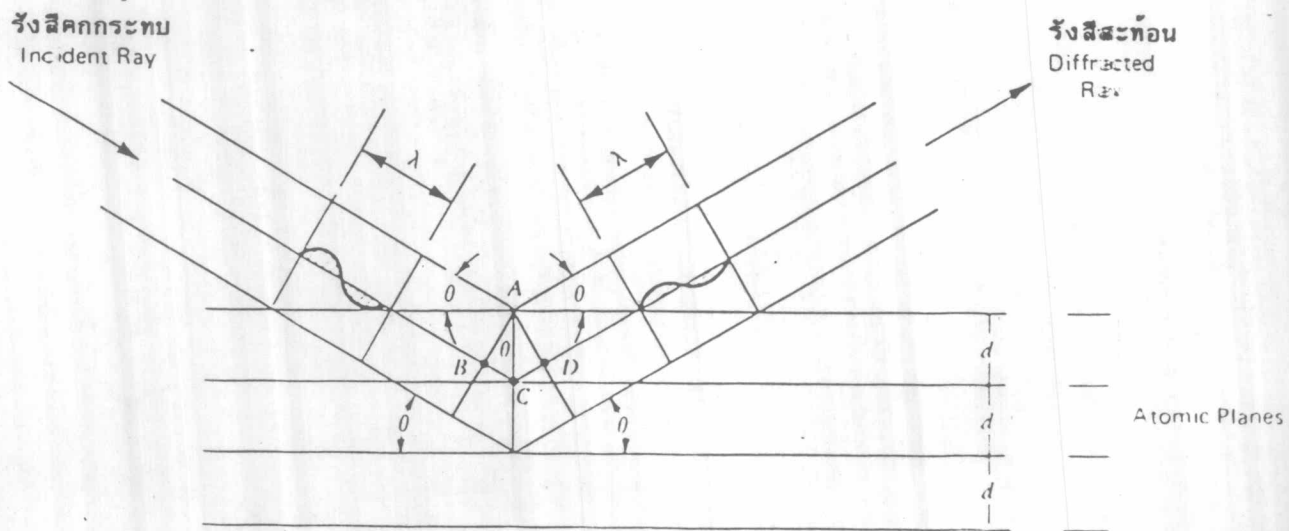
แต่จากการสมมาตรกัน $BC = CD$ และจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ $CD=d\sin\theta$ ดังนั้นสมการ (1) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$n\lambda = 2 d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎของ Bragg ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดของผลึกเมื่อใช้ X-ray diffraction เนื่องจากระยะห่างระหว่าง atomic plane



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์รวมของความเข้มของการแผ่รังสีเอ็กซ์ กับ ความยาวคลื่น



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ตามกฎของBragg

ใน 3 มิติของแร่แต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังนั้นมุมของรังสีสะท้อนจึงสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงชนิดของแร่ได้ X-ray diffraction นี้เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดของแร่ดินเหนียวด้วย เพราะระยะห่างของ atomic plane (001) มีค่าเฉพาะสำหรับแต่ละชนิดของแร่ดินเหนียว basal plane จะสะท้อนรังสีได้ดีที่สุดในโครงสร้างผลึก เพราะอะตอมใน plane นี้จะอยู่กันอย่างหนาแน่น นอกจากนี้ X-ray diffraction ยังสามารถที่จะใช้ตรวจสอบพวกแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียวในดินได้ดีเช่นกัน

การตรวจจัมรังสี เอ็กซ์ที่สะท้อนออกมา

รังสีที่สะท้อนออกมาจะถูกดักจับโดยใช้เครื่องมือ 2 ชนิดคือ

1. ฟิล์ม โดยติดตั้งอยู่ในกล้องรูปทรงกระบอก การที่สามารถใช้ฟิล์มบันทึกผลได้เพราะรังสี เอ็กซ์ทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับแสงอาทิตย์
2. Geiger Muller counting tube เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีที่สะท้อนออกมาโดยตรงแล้วบันทึกค่าโดยอัตโนมัติ

การเตรียมตัวอย่างดิน

การเตรียมตัวอย่างเมื่อจะทำการวิเคราะห์ดินเหนียวโดยใช้ X-ray diffraction นี้มีอยู่ 2 วิธีคือ

- Random powder method
- Oriented aggregate method

1. Random powder method เป็นการเตรียมตัวอย่างดินโดยใช้ตัวอย่างที่บดละเอียดและผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำมาใส่ในถ้วยดี เนื่องจากอนุภาคเล็ก ๆ แต่ละอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่เป็นไปได้ที่จะมีบางอนุภาคจัดเรียงตัวขนานกัน เมื่อถูกรังสีเอ็กซ์มาตกกระทบแล้วจะสะท้อนออกไปด้วยความเข้มของรังสีต่าง ๆ แล้วถูกดักจับโดยแผ่นฟิล์มหรือ Geiger Muller counting tube ความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาจากการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธีนี้จะ เป็นสัดส่วนใกล้เคียงกับจำนวนผลึกที่

เดียวเพื่อจะได้มั่นใจว่าการขยายตัวซึ่งมีผลจากปฏิกิริยา hydration นั้นจะเป็นแบบเดียวกันในโครงสร้างผลึก การวิเคราะห์โดยทั่วไปมักทำกันในสภาพที่ตัวอย่างแห้งในอากาศ (air dry) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกประจุวกชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไป Mg^{2+} เป็นประจุวกที่ทำให้หน้าที่ถูกดูดซึมอยู่ระหว่าง interlayer ของชั้นซิลิเกตขยายตัวเป็นแบบเดียวกัน และ K^+ เป็นประจุวกที่จำกัดการดูดซึมน้ำใน interlayer ของเวอร์มิคูไลท์ ดังนั้นจึงเป็นประจุวกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยทั่วไป (Hellman, et al., 1943, Mac Ewan, 1946 และ Walker, 1957)

ตัวอย่างที่ทำให้มีน้ำด้วย K^+ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$. เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะทำให้ hydroxy complex ถูกทำลายลง ซึ่งจะทำให้ระยะห่าง interlayer ของเวอร์มิคูไลท์หดตัวลง แต่คลอไรด์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างที่ผสมกรีเซอรอล $\{C_3H_5(OH)_3\}$ ลงไปจะทำให้ระยะห่างของ interlayer ในแร่ดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนท์ขยายตัวจาก 14 \AA เป็น 17.7 \AA (Mac Evan, 1944, Bradley, 1945, White และ Jackson, 1947) ในขณะที่แร่ดินเหนียวเวอร์มิคูไลท์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง (Walker, 1950; Barshad, 1950) ปรากฏการณ์นี้เป็นข้อแตกต่างที่จะใช้ในการแยกชนิดของแร่ดินเหนียวทั้ง 2 ชนิดนี้ สำหรับตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของแร่ดินเหนียวโดยวิธี X-ray diffraction จากการเตรียมตัวอย่างดินทั้งหมด 4 แบบดังกล่าวข้างต้นได้แสดงในตารางที่ ข.1

การวิเคราะห์ X-ray diffraction pattern

X-ray diffraction pattern ที่ได้มาไม่ว่าจะเป็นจากฟิล์มหรือจาก Geiger Muller counting tube จะให้ผลที่ประกอบด้วยมุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับแนวระนาบ (θ) กับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนจากผลึกของแร่ในตัวอย่างดิน ขึ้นแรกในการวิเคราะห์ทำ โดยหาระยะห่างของ interlayer โดยใช้กฎของ Bragg ดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.2 จากโลหะที่ใช้ทำเป้าหมายแตกต่างกันจะทำให้ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่จะนำมาวิเคราะห์แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้ทองแดง (Cu) เป็นเป้า ดังนั้นความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเท่ากับ 1.54 \AA ในการวิเคราะห์ผลจะนำระยะห่างระหว่าง interlayer (d) ของ

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ชนิดของแร่ดินเหนียวโดยวิธี X-ray diffraction

Diffraction spacing (Å.)	Mineral (or minerals) indicated
<u>Mg-saturated, air-dried</u>	
14-15	Montmorillonite, vermiculite, chlorite
9.9-10.1	Mica (illite), halloysite
7.2- 7.5	Metahalloysite
7.15	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
<u>Mg-saturated, glycerol-solvated</u>	
17.7-18.0	Montmorillonite
14-15	Vermiculite, chlorite
10.8	Halloysite
9.9-10.1	Mica (illite)
7.2- 7.5	Metahalloysite
7.15	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
<u>K-saturated, air-dried</u>	
14-15	Chlorite, vermiculite (with interlayer aluminum)
12.4-12.8	Montmorillonite
9.9-10.1	Mica (illite), halloysite, vermiculite (contracted)
7.2- 7.5	Metahalloysite
7.15	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
<u>K-saturated, heated (500° C.)</u>	
14	Chlorite
9.9-10.1	Mica, vermiculite (contracted), montmorillonite (contracted)
7.15	Chlorite (2nd-order maximum)

ตารางที่ ข.2 การแปลงมุม θ ไปเป็นระยะห่างของ interlayer ตามกฎของ Bragg เมื่อสารที่ใช้ทำเป็นทองแดง (CuK α)

CuK α_1 , $\lambda = 1.5405$ Å

θ	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'
		1/10	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10
0°		441.32	220.66	147.11	110.33	88.265	73.555	63.048	55.167	49.038
1	44.134	40.123	36.779	33.950	31.526	29.425	27.586	25.964	24.521	23.230
2	22.069	21.020	20.065	19.193	18.393	17.658	16.980	16.351	15.767	15.224
3	14.717	14.243	13.798	13.380	12.987	12.617	12.268	11.937	11.623	11.325
4	11.042	10.773	10.517	10.273	10.040	9.8172	9.6043	9.4004	9.2050	9.0176
5	8.8177	8.6648	8.5086	8.3587	8.2147	8.0763	7.9431	7.8154	7.6920	7.5732
6	7.3688	7.2485	7.1320	7.0192	6.9100	6.8042	6.7016	6.6021	6.5054	6.4115
7	6.3204	6.2317	6.1456	6.0619	5.9804	5.9011	5.8240	5.7487	5.6755	5.6041
8	5.5345	5.4666	5.4004	5.3358	5.2727	5.2111	5.1510	5.0922	5.0347	4.9785
9	4.9236	4.8700	4.8176	4.7663	4.7161	4.6669	4.6187	4.5715	4.5253	4.4800
10	4.4357	4.3923	4.3497	4.3079	4.2669	4.2267	4.1873	4.1486	4.1106	4.0733
11	4.0367	4.0008	3.9656	3.9310	3.8970	3.8635	3.8306	3.7983	3.7666	3.7354
12	3.7047	3.6745	3.6448	3.6156	3.5869	3.5587	3.5309	3.5036	3.4767	3.4502
13	3.4241	3.3984	3.3731	3.3482	3.3237	3.2995	3.2757	3.2522	3.2291	3.2063
14	3.1839	3.1618	3.1400	3.1185	3.0973	3.0764	3.0558	3.0354	3.0153	2.9955
15	2.9760	2.9567	2.9377	2.9190	2.9005	2.8822	2.8642	2.8465	2.8289	2.8116
16	2.7945	2.7776	2.7609	2.7444	2.7281	2.7120	2.6961	2.6804	2.6649	2.6496
17	2.6344	2.6196	2.6048	2.5902	2.5758	2.5615	2.5474	2.5334	2.5196	2.5060
18	2.4926	2.4793	2.4661	2.4531	2.4402	2.4274	2.4148	2.4024	2.3901	2.3779
19	2.3659	2.3540	2.3422	2.3305	2.3189	2.3075	2.2962	2.2850	2.2739	2.2629
20	2.2520	2.2412	2.2306	2.2201	2.2097	2.1994	2.1892	2.1790	2.1690	2.1591
21	2.1493	2.1396	2.1299	2.1204	2.1110	2.1017	2.0924	2.0832	2.0741	2.0651
22	2.0562	2.0473	2.0385	2.0298	2.0213	2.0128	2.0044	1.9960	1.9877	1.9795
23	1.9713	1.9632	1.9552	1.9473	1.9394	1.9316	1.9239	1.9163	1.9087	1.9012
24	1.8938	1.8864	1.8790	1.8717	1.8645	1.8574	1.8503	1.8433	1.8363	1.8294
25	1.8226	1.8158	1.8091	1.8024	1.7958	1.7892	1.7826	1.7761	1.7697	1.7633
26	1.7571	1.7508	1.7446	1.7384	1.7323	1.7262	1.7202	1.7143	1.7084	1.7025
27	1.6967	1.6909	1.6851	1.6794	1.6737	1.6681	1.6625	1.6570	1.6515	1.6461
28	1.6407	1.6353	1.6300	1.6247	1.6195	1.6143	1.6091	1.6040	1.5989	1.5938
29	1.5887	1.5837	1.5788	1.5739	1.5690	1.5642	1.5594	1.5546	1.5499	1.5452
30	1.5405	1.5358	1.5312	1.5266	1.5221	1.5176	1.5131	1.5087	1.5043	1.5000

ตัวอย่างดินที่ได้มา เปรียบเทียบกับ pattern มาตรฐานของแร่บริสุทธิ์ ข้อมูล X-ray diffraction pattern ของแร่ที่พบโดยทั่วไปในดินแสดงในตารางที่ ข.3

การวิเคราะห์หาปริมาณของแร่โดยวิธี X-ray diffraction

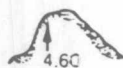
การหาปริมาณของแร่ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างดินเหนียว โดยใช้การเปรียบเทียบความสูงของ diffraction peak หรือพื้นที่ใต้ diffraction peak โดยใช้หลักการ เปรียบเทียบแบบธรรมดา ๆ นั้นไม่สามารถจะทำได้ถูกต้อง เนื่องจากความแตกต่างกันของคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างดินเหนียว กล่าวคือ สมบัติของการดูดซึมรังสี ปริมาณของสารแต่ละชนิดซึ่งเป็นส่วนประกอบ ลักษณะผิวของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกและลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาค เป็นต้น ดังนั้น การเปรียบเทียบปริมาณของสารซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างดินเหนียวจึงเป็นไปได้ยาก แต่อาจจะทำได้ผลที่ดีเมื่อใช้ internal standard ซึ่งเป็นสารประกอบพวก ZnO_2 มาใช้ประกอบการวิเคราะห์

เนื่องจากหลักที่ว่าความสูงของ diffraction peak จะแปรโดยตรงกับปริมาณของสารประกอบที่ก่อให้เกิด diffraction peak นั้น ดังนั้นจึงอาจเปรียบเทียบปริมาณของสารประกอบชนิดเดียวกันในแต่ละตัวอย่างดินเหนียวโดยประมาณได้

สำหรับตัวอย่างในการวิเคราะห์หาชนิดของแร่ดินเหนียวซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างดินเหนียวได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

ตารางที่ ข.3 ข้อมูล X-ray diffraction ของแร่ที่พบโดยทั่วไปในดิน

$d(\text{Å})$	Mineral ^b	$d(\text{Å})$	Mineral ^b
14	<i>Mont. (VS) Chl. Verm. (VS)</i>	2.93-3.00	Felds.
12	<i>Sepiolite, heated corrensite</i>	2.89-2.90	Carb.
10	<i>Illite, Mica(S)</i>	2.86	Felds.
9.23	Heated Verm.	2.84	Carb. <i>Chl.</i>
7	<i>Kaol.(S). Chl.</i>	2.84-2.87	<i>Chl.</i>
6.90	<i>Chl.</i>	2.73	Carb.
6.44	Attapulgit	2.61	Attapulgit
6.39	<i>Felds.</i>	2.60	Verm., Sepiol.
4.90-5.00	<i>10Å (2nd)</i>	2.56	Illite (VS), Kaol.
4.70-4.79	<i>Chlor. (S)</i>	2.53-2.56	Chlor., Felds., Mont.
4.60	Sepiol., Verm. (S)	2.49	Kaol. (VS)
4.45-4.50	Illite (VS)	2.46	Quartz, heated Verm.
4.46	Kaol.	2.43-2.46	Chlorite
4.36	Kaol.	2.39	<i>Verm., Illite</i>
4.26	Quartz (S)	2.38	<i>Kaol.</i>
4.18	Kaol.	2.34	Kaol. (VS)
4.02-4.04	Felds.(S)	2.29	Kaol. (VS)
3.85-3.90	Felds.	2.28	Quartz, Sepiol.
38.2	Sepiol.	2.23	Illite, Chl.
3.78	Felds.	2.13	Quartz, Mica
3.67	Felds.	2.05-2.06	Kaol. (WK)
3.58	Carbonate, Chl.	1.99-2.00	<i>Mica, Illite(S), Kaol. Chl.</i>
3.57	<i>Kaol. (VS), Chl.</i>	1.90	Kaol.
3.54-3.56	Verm.	1.83	Carb.
3.50	Felds., Chlor.	1.82	Quartz
3.40	Carb.	1.79	Kaol.
3.34	Quartz (VS)	1.68	Quartz
3.32-3.35	<i>Illite (VS)</i>	1.66	Kaolin
3.30	Carb.	1.62	Kaolin
3.23	Attapulgit	1.54B	Verm. (S), Quartz
3.21	Felds.	1.55	Quartz
3.20	Mica	1.58	Chl.
3.19	<i>Felds. (VS)</i>	1.53	Verm., Illite (Trioctahed)
3.05	Mont.	1.50	Ill. (S), Kaol.
3.04	Carb. (VS)	1.48-1.50	Kaol. (VS), Mont.
3.02	Felds.	1.45B	Kaol.
3.00	Heated Verm.	1.38	Quartz, Chl.
2.98	Mica (S)	1.31, 1.34, 1.36	Kaol. (B)



^a *Italics: (001) spacing.*

^b (B) = broad; (S) = strong; (VS) = very strong; (WK) = weak; Mont. = Montmorillonite; Chl = Chlorite; Verm. = Vermiculite; Kaol. = Kaolinite; Carb = Carbonate; Felds. = Feldspar; Sepiol. = Sepiolite.

ภาคผนวก ค.

Differential Thermal Analysis (DTA)

การวิเคราะห์โดยวิธี Differential Thermal Analysis (DTA) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบ ทั้งชนิดและปริมาณของแร่และสารต่าง ๆ รวมทั้งอินทรีย์สารที่ประกอบอยู่ภายใน ดิน หินหรือสารประกอบต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Thermoanalyzer

หลักการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยความร้อนทำได้โดยการเพิ่มความร้อนให้แก่ตัวอย่างดินและ Inert Material ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคงที่ (โดยทั่วไปอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 10°C./นาท) จนอุณหภูมิประมาณ 1000°C . ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แยกออกได้เป็น 2 กรณีคือ

1. Differential Thermal Analysis (DTA) โดยวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่าง (Sample) กับ Inert Material เมื่อสารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกบันทึกบนกระดาษกราฟในลักษณะของปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) หรือปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) แล้วแต่ละชนิดของปฏิกิริยา โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ ค.1 อาศัยหลักการที่ว่าพื้นที่ใต้กราฟของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของสารตัวอย่างกับลักษณะและชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของสารบริสุทธิ์ (pure mineral) ก็สามารถรู้ถึงชนิดและปริมาณของสารหรือแร่ที่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมินั้นได้

2. Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่สูญเสียไปของสารตัวอย่างขณะถูกเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้เครื่องชั่งไฟฟ้าในการบันทึกและแสดงผลควบคู่กับการวิเคราะห์ DTA ดังรูปที่ ค.1

ในการทดลองนี้จะทำเฉพาะ DTA เท่านั้น

เครื่องมือ

ส่วนประกอบหลักของ เครื่องมือมีดังนี้

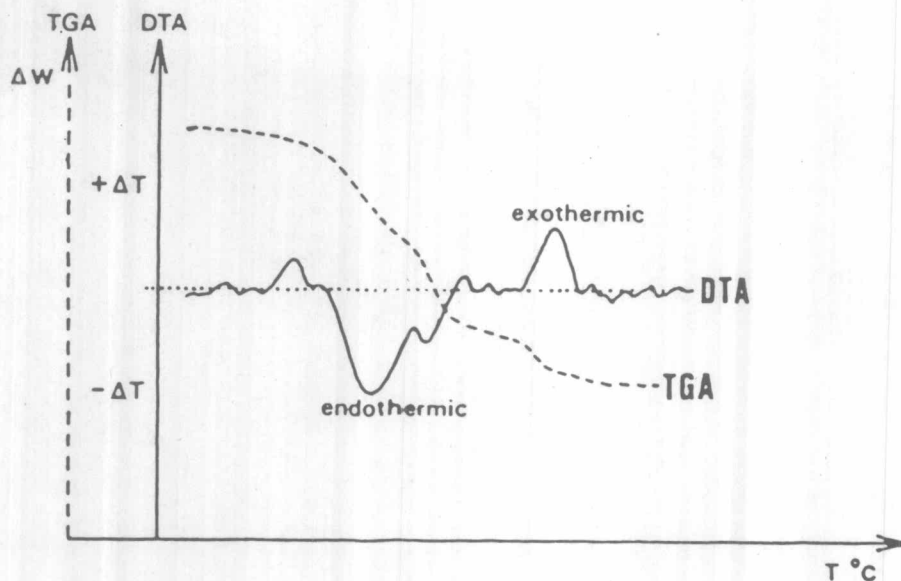
- Sample holder เป็นที่สำหรับใส่สารที่จะทำการวิเคราะห์และ Inert Material อาจทำจากเซรามิก นิเกิลหรือแพลตตินัม
- furnace เป็นตัวให้ความร้อน ซึ่งต้องมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีอัตราการเพิ่มและลดที่คงที่ตลอดการทดลอง
- thermocouple เป็นตัววัดอุณหภูมิหรือความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างกับ Inert Material
- recorder เป็นส่วนที่ใช้บันทึกผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เครื่องมือนี้แสดงเป็นผังในรูปที่ ค.2 ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะขึ้นกับคุณสมบัติของตัวอย่าง แต่ขนาดและรูปร่างของ peak จะขึ้นกับคุณลักษณะทางด้านความร้อนของ เครื่องมือที่ใช้และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

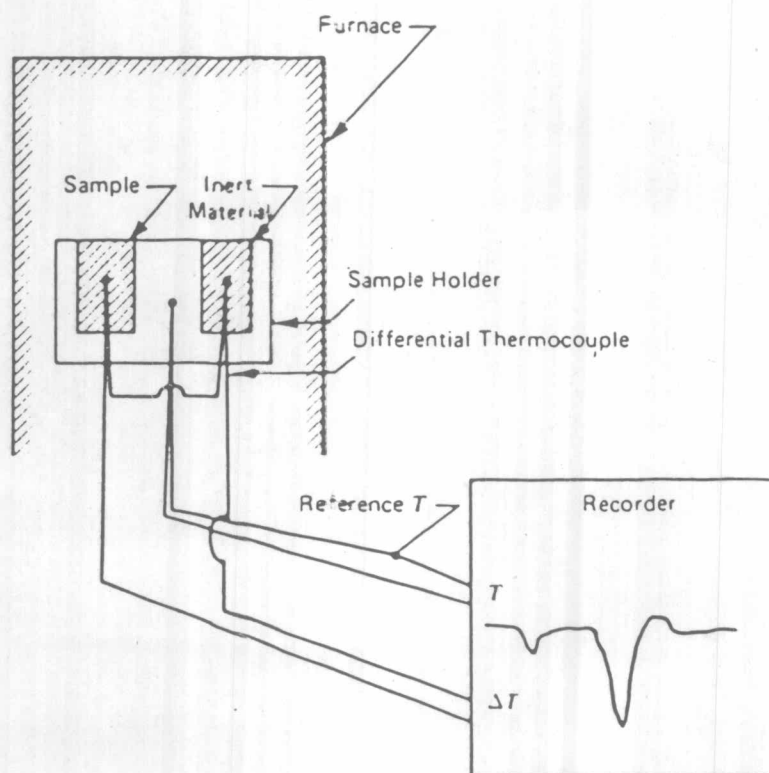
ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิด peak คือ

ปฏิกิริยาความร้อนที่สำคัญที่ก่อให้เกิด peak คือ

1. Dehydration คือการที่น้ำที่อยู่ในช่องว่างของมวลคินกับน้ำที่ถูกดึงดูโดยปฏิกิริยาไฮเดรชัน (water of hydration) จะถูกไล่ออกไปที่อุณหภูมิประมาณ $100-300^{\circ}\text{C}$. ส่วนน้ำซึ่งถูกยึดด้วยโครงสร้างของแร่คินเหนียวในรูปแบบของประจุ OH^- จะถูกไล่ออกไปที่อุณหภูมิประมาณ $500-800^{\circ}\text{C}$. โดยจะเรียกขบวนการนี้ว่า Dehydroxylation เมื่อน้ำในรูปแบบนี้ถูกไล่ออกไปจะทำให้โครงสร้างของสารนั้นพังลง อุณหภูมิที่ให้น้ำในโครงสร้างผลึกสูญหายไปนี้จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ปฏิกิริยา Dehydration นี้จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)



รูปที่ ค.1 ลักษณะของกราฟที่ได้มาจากการวิเคราะห์แบบ DTA และ TGA



รูปที่ ค.2 ผังการทำงานของเครื่อง Thermoanalyzer

2. Crystallization คือการรวมตัวเป็นผลึกใหม่ซึ่งอาจเกิดจากสารที่ไม่มีโครงสร้างผลึก (amorphous material) หรือสารประกอบออร์แกนิคที่ได้มาจากการสลายตัวของโครงสร้างผลึกเก่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า ปฏิกริยา Crystallization นี้จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อน ดังนั้นจึงเป็นปฏิกริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)

3. Phase change แร่บางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างผลึกเมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่ง พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจะก่อให้เกิด peak เช่น ควอทซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบจาก α ไปเป็น β ที่อุณหภูมิ 573°C . การเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกของควอทซ์นี้จะแปรเปลี่ยนกลับไปได้ ($\alpha \rightleftharpoons \beta$)

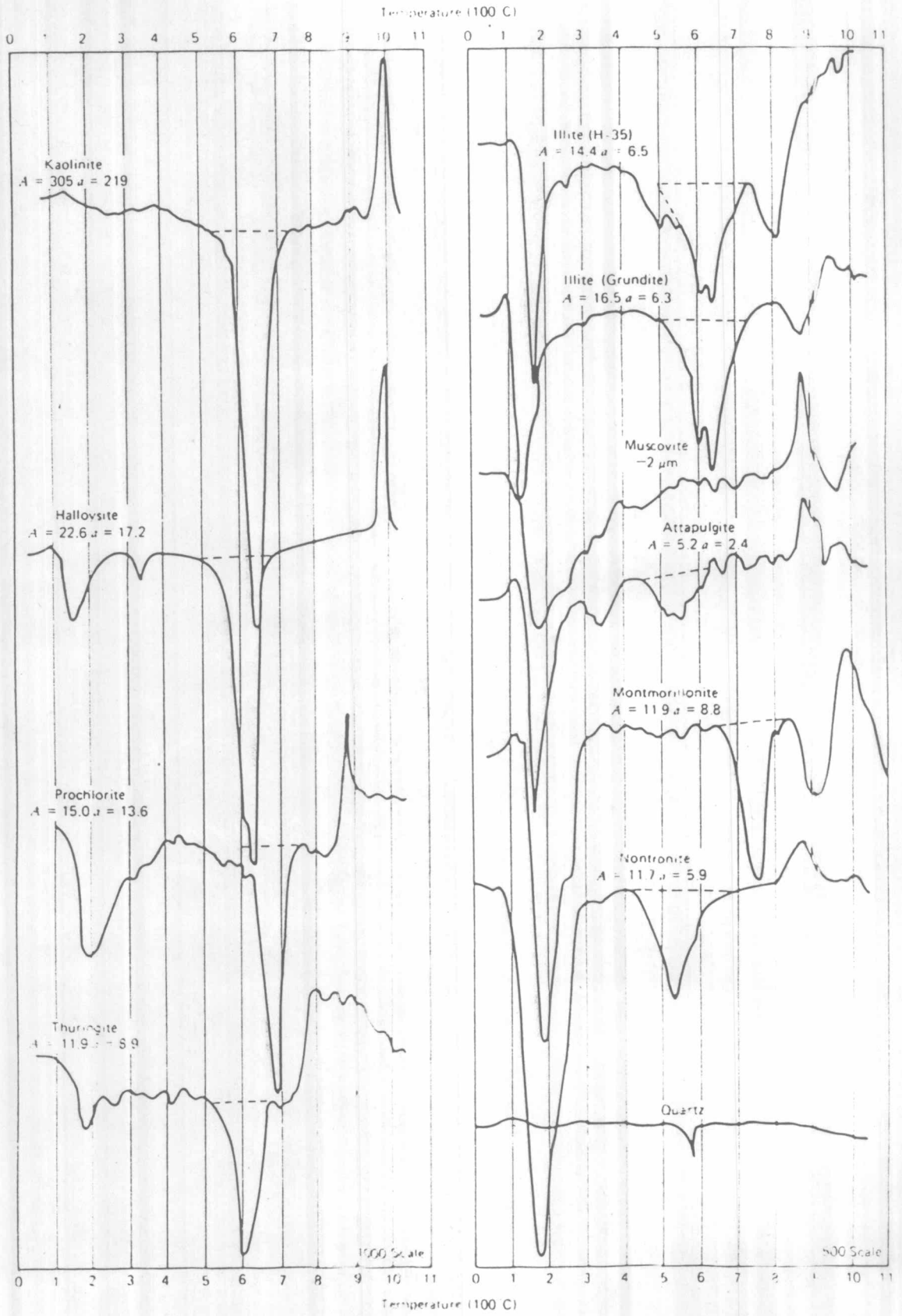
4. Oxidation ปฏิกริยานี้จะเป็นปฏิกริยาคายความร้อน เช่นการเผาไหม้ของอินทรีย์สารหรือการ Oxidation ของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} อินทรีย์สารจะเกิดปฏิกริยา Oxidation ที่อุณหภูมิระหว่าง $250-450^{\circ}\text{C}$.

ลักษณะของ thermogram

ลักษณะ thermogram ของแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ และควอทซ์ที่ได้จากการศึกษาในอดีตได้แสดงในรูปที่ ค.3 ลักษณะ thermogram ของตัวอย่างดินตามที่ใช้ในการวิจัยนี้และ thermogram ของแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์แสดงในภาคผนวก ง.

โดยทั่วไปแล้วแร่ดินเหนียวจะเกิดปฏิกริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 200°C . เนื่องจากการสูญเสียน้ำในช่องว่างระหว่างมวลดินและน้ำที่อุกซิมมา ส่วนปฏิกริยา dehydroxylation จะเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง $500-800^{\circ}\text{C}$. ที่อุณหภูมิประมาณ $800-1000^{\circ}\text{C}$. จะเกิดปฏิกริยาคายความร้อนซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดผลึกใหม่

Barshad (1965) ศึกษาพบว่าเหตุที่รบกวนทางด้านความร้อนของแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์นี้จะแตกต่างจากดินที่เก็บมาจากธรรมชาติพอสมควร ดังนั้นจึงมีความลำบากในการเลือก reference standard เช่นในบางที แร่ดินเหนียวพวกมอนท์โมริลโลไนท์ อิลไลต์ เวอร์มิคูไลท์ หรือพวก mica-like mineral ซึ่งอยู่ในดินตามธรรมชาติอาจจะไม่แสดงว่ามีปฏิกริยาคายความร้อนเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำในโครงสร้างผลึก



รูปที่ ค.3 ลักษณะ thermogram ของแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ โดยความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มจากของสารตัวอย่างเท่ากับ 50% และ A เป็นพื้นที่ (ซม²) a เป็นความสูงของ peak (ซม.) (Mitchell, 1976)

การวิเคราะห์หาปริมาณของแร่

พื้นที่ได้กราฟของบริ เวณที่เกิดปฏิกิริยาจะ เป็นดัชนีที่ใช้วัดปริมาณของแร่ในตัวอย่างดิน โดยนำมา เปรียบ เทียบกับพื้นที่ได้กราฟของบริ เวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ได้จากแร่ดิน เหนียวบริสุทธิ์

การวิเคราะห์หาปริมาณของแร่ดิน เหนียวทำโดย เปรียบ เทียบพื้นที่ได้กราฟ DTA ของบริ เวณที่เกิดปฏิกิริยาของดิน เหนียวตัวอย่างกับแร่ดิน เหนียวบริสุทธิ์ โดยพื้นที่ได้กราฟของ บริ เวณที่ทำปฏิกิริยาจะใช้น้ำหนักของกระดาษที่มี เนื้อกระดาษสม่ำเสมอ (กระดาษไข) ที่มีพื้นที่ เท่า พื้นที่ได้กราฟของบริ เวณที่ทำปฏิกิริยามาคิดหาปริมาณแทนหน่วยพื้นที่ วิธีหาปริมาณตามที่กล่าวมานี้ จะให้ผลที่ละเอียดกว่าการวัดหน่วยพื้นที่ เพราะรูปทรงของ ไม่ได้มีรูปทรงที่แน่นอนแบบ เรขาคณิต จึง เป็นการยากที่จะหาพื้นที่ได้ถูกต้อง

สำหรับตัวอย่างในการวิเคราะห์หาปริมาณของแร่ดิน เหนียวโดยใช้วิธี DTA นี้ได้ แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างในการวิเคราะห์ทางด้านแร่และข้อมูลในการทดลอง

ตัวอย่างในการวิเคราะห์ทางด้านแร่ที่จะแสดงในตอนนี้จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่ของดินเหนียวโดยวิธี X-ray diffraction
- วิเคราะห์หาปริมาณของแร่ดินเหนียวโดยวิธี DTA

โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังนี้

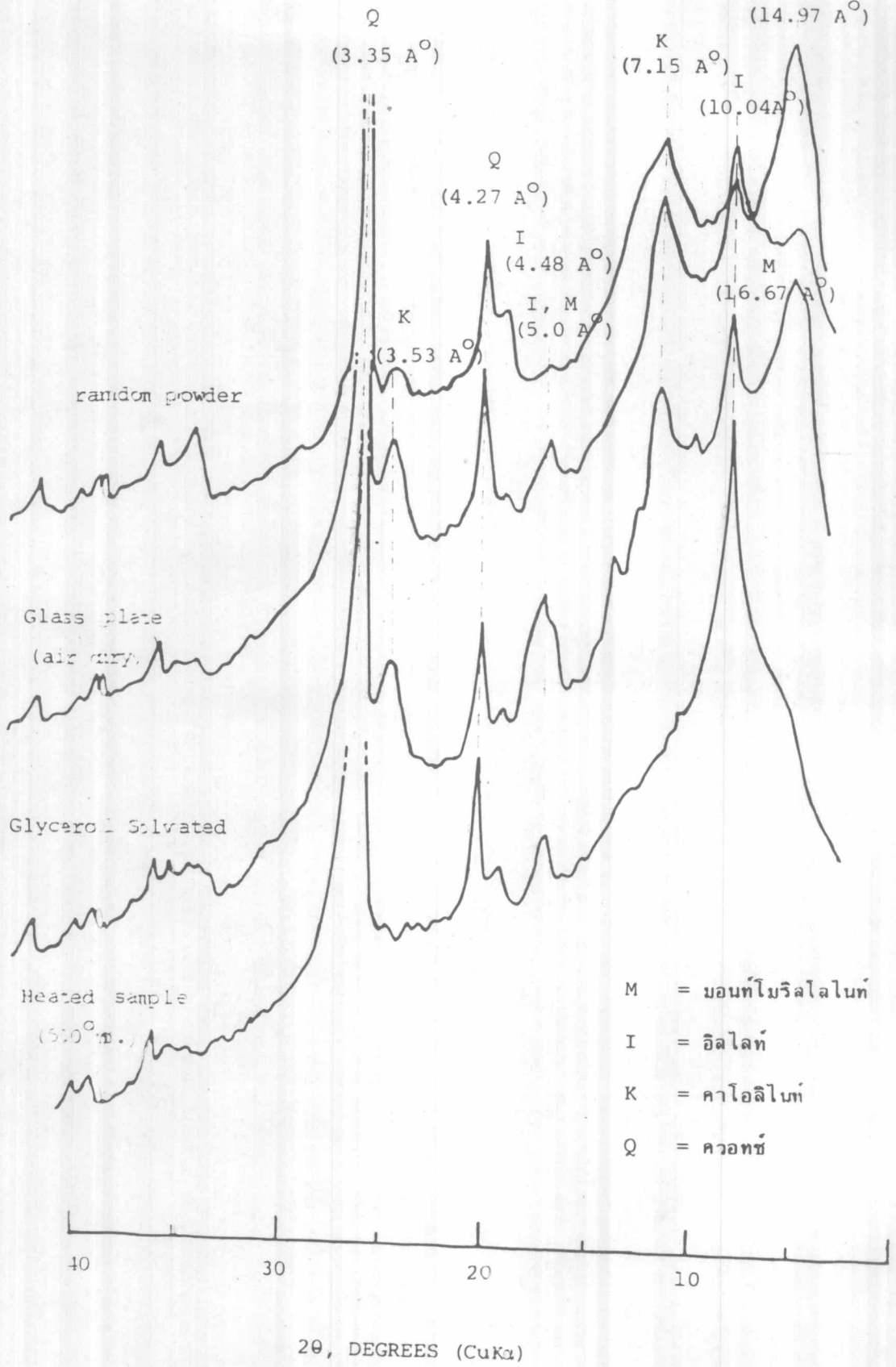
ง.1 วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางด้านแร่ของดินเหนียวโดยวิธี X-ray diffraction

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงรายละเอียดและวิธีการทดลอง X-ray diffraction ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง X-ray diffraction นั้นเรียกว่า X-ray diffraction pattern ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ X-ray diffraction pattern ของดินเหนียว เหน่าซึ่งข้อมูลแสดงในรูปที่ ง.1 โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1. จาก X-ray diffraction pattern ของดินเหนียว เหน่าที่เตรียมตัวอย่าง เป็น 4 ประเภท พบว่าเกิด peak ที่มุม θ ($\text{CuK}\alpha$) ต่าง ๆ ดังนี้

Random powder	2.95, 4.40, 6.15, 8.85, 9.90, 10.40, 12.60, 13.30
Glass plate (air dry)	2.95, 4.40, 6.15, 8.85, 9.90, 10, 40, 12.60, 13.30
Glycerol Solvated	2.65, 4.40, 6.15, 8.85, 9.90, 10.40, 12.60, 13.30
500 ^o ซ. 1 ชั่วโมง	- , 4.40, - , 8.85, 9.90, 10.40, - , 13.30

2. จากมุมที่เกิด peak ต่าง ๆ ที่ได้จาก X-ray diffraction pattern สามารถจะแปลงไปเป็นระยะห่างของ interlayer ได้โดยใช้กฎของ Bragg ซึ่งแสดงในตารางที่ ข.2 จะได้ระยะห่างของ interlayer (A°) ดังนี้



- M = ขอนท์โมริลไลนัท
- I = อิลไลท์
- K = คาโอลิไนท์
- Q = ควอทซ์

รูปที่ ง.1 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่า เมื่อ เติบโตด้วยอ่างดิน
แบบต่าง ๆ

Random powder	14.97, 10.04, 7.15, 5.0, 4.48, 4.27, 3.53, 3.35
Glass plate (air dry)	14.97, 10.04, 7.15, 5.0, 4.48, 4.27, 3.53, 3.35
Glycerol Solvated	16.67, 10.04, 7.15, 5.0, 4.48, 4.27, 3.53, 3.35
500° ซ. 1 ชั่วโมง	- , 10.04, - , 5.0, 4.48, 4.27, - , 3.35

3. จากตารางที่ข.3 ซึ่งเป็นข้อมูลของ X-ray diffraction ของแร่ที่พบ โดยทั่วไปในดิน เมื่อนำเอาข้อมูลที่ได้จากข้อ 2 ไปเปรียบเทียบกับจะทราบชนิดของแร่ที่เป็นส่วนประกอบ จากข้อมูลที่เตรียมตัวอย่างแบบ Random power พบว่า

- peak ที่ 14.97 A° คือมอนท์โมริลไลนัทหรือเวอร์มิคูไลต์
- peak ที่ 10.04, 4.48 A° คืออิลไลต์
- peak ที่ 7.15, 3.53 A° คือคาโอลิไนท์
- peak ที่ 4.27, 3.35 A° คือควอทซ์

4. การวิเคราะห์ข้อมูล X-ray diffraction ที่เตรียมตัวอย่างแบบ Random powder ที่แสดงในข้อ 3. ยังไม่สามารถจะจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียวได้อย่างเด่นชัด จึงได้มีการเตรียมตัวอย่างอีก 3 ประเภทดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในภาคผนวก ข. มาประกอบการพิจารณา เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้อีกตารางที่ ข.1 จะพบว่า แร่ดินเหนียวที่เป็นส่วนประกอบของดินหนองงูเห่าคือ

- มอนท์โมริลไลนัท เพราะพบว่าจากการเตรียมตัวอย่างแบบ Random powder และ Glass plate (air dry) เกิด peak ที่ 14.97 A° และเมื่อเตรียมตัวอย่างแบบ Glycerol Solvated พบว่า ระยะห่างของ interlayer ขยายเป็น 16.67 A° แต่ไม่ถึง 17.7 A° ตามตารางที่ ข.1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขณะเตรียมตัวอย่างโดยวิธีนี้ แร่ดินเหนียวยังไม่อิ่มตัวด้วย glycerol ดีพอ ดังนั้น peak ที่ 14.97 A° นี้คือ มอนท์โมริลไลนัท

- อิลไลต์ เพราะพบว่าจากการเตรียมตัวอย่างทั้ง 4 ประเภท จะมี peak ที่ 10 A° อยู่ตลอดแสดงว่ามีแร่ดินเหนียวอิลไลต์

- คาโอไลไนท์ เพราะพบว่าจากการเตรียมตัวอย่างดินแบบ Random powder และ Glass plate (air dry) เกิด peak ที่ 7.15 A° และจากการเตรียมตัวอย่างดินแบบ Glass plate และเผาที่อุณหภูมิ 500°ซ. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า peak ที่ 7.15 A° หายไป แสดงว่ามีแร่ดินเหนียวคาโอไลไนท์

สำหรับดินพานทองและดินระนองก็ได้ทำการวิเคราะห์ถึงส่วนประกอบทางด้านแร่ โดยวิธีการเดียวกัน

ง.2 วิเคราะห์หาปริมาณของแร่ดินเหนียวโดยวิธี DTA

Thermogram ที่ได้จากการทดลอง DTA จะแสดงถึงผลต่างของอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาของดินตัวอย่างกับอุณหภูมิของการเผาในเครื่องมือ Thermoanalyzer

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า DTA เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ประกอบการศึกษาการวิเคราะห์วิธีอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ประกอบการศึกษา X-ray diffraction ในที่นี้จะได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ Thermogram ของดินหนองงูเห่าซึ่งแสดงในรูปที่ ง.4 โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1. จาก Thermogram ของดินหนองงูเห่า พบว่าเกิด peak ของปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) ดังนี้

อุณหภูมิ, °ซ.	120	.	554
พื้นที่ใต้กราฟ, หน่วย	0.039	.	0.0265

2. นำเอาผลที่ได้จากข้อ 1 ไปเปรียบเทียบกับ thermogram ของแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์ พบว่า thermogram ของปฏิกิริยาดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120°ซ. คือมอนท์ไมริลโลไนท์ ส่วนแร่มอนท์ไมริลโลไนท์บริสุทธิ์มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 0.10417 หน่วย ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแร่มอนท์ไมริลโลไนท์ในดินหนองงูเห่า} &= \frac{0.039}{0.10417} \times 100 \\ &= 37.4 \% \end{aligned}$$

35 % ของดินที่มีขนาด <0.002 มม.

แต่ thermogram ของดินหนองงูเห่าที่อุณหภูมิประมาณ 554°C . นั้นพบว่า เป็น thermogram ของแร่โอลิไท์และคาโอลิไนท์ สำหรับ thermogram ของคาโอลิไนท์บริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 600°C . นั้นมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 0.05856 หน่วย และจากพื้นที่ใต้กราฟ 0.0265 หน่วย เมื่อ เปรียบ เทียบโดยใช้น้ำหนักดินเท่ากันจะกลายเป็น 0.0206 หน่วย ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแร่คาโอลิไนท์ในดินหนองงูเห่า} &= \frac{0.0206}{0.05856} \times 100 \\ &= 35 \% \text{ ของดินที่มีขนาด } < 0.002 \text{ มม.} \end{aligned}$$

ปริมาณแร่โอลิไท์ในดินหนองงูเห่าจะ เป็น 30 % ของดินที่มีขนาด < 0.002 มม.

สำหรับในดินพานทองและดินระนองได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูล เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ดินหนองงูเห่า

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม เมื่อใช้ปริมาณปูนขาวและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ

ชนิดดิน	ปริมาณปูนขาว (%)	Unconfined Compressive Strength, Q_u (กก./ซม ² .)									
		ที่ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)									
		0	1	7	14	21	28	30	56	84	168
ดินหนองงูเห่า	-	5.10	-	5.06	-	-	-	5.07	-	-	-
	2	-	5.09	5.09	5.08	5.10	5.07	-	5.09	5.08	5.06
	4	-	6.60	6.88	6.95	6.90	6.90	-	6.91	7.20	7.25
	6	-	6.81	8.40	8.60	9.00	9.35	-	9.84	10.00	10.25
	10	-	6.69	9.47	10.40	10.90	11.20	-	14.28	15.80	16.00
ดินพานทอง	-	4.90	-	4.92	-	-	-	5.00	-	-	-
	2	-	5.70	5.73	5.80	5.58	5.73	-	6.33	6.34	6.34
	4	-	5.55	6.35	6.53	7.38	7.59	-	7.65	7.65	7.65
	6	-	5.87	7.16	7.75	8.18	8.20	-	8.25	9.38	10.65
	10	-	5.62	7.59	7.95	8.83	8.85	-	9.00	11.80	-
ดินระนอง	-	4.20	-	4.15	-	-	-	4.18	-	-	-
	2	-	4.65	5.29	5.58	5.20	5.20	-	5.21	5.23	5.22
	4	-	4.87	6.15	6.55	6.68	6.71	-	6.78	6.78	6.84
	6	-	4.57	7.37	8.60	8.65	8.72	-	8.98	9.00	9.24
	10	-	5.26	7.63	11.03	11.70	12.25	-	13.85	14.76	15.99

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาว 6 %
ที่อุณหภูมิในการบ่มต่าง ๆ

ชนิดดิน	ปริมาณปูนขาว (%)	อุณหภูมิ ในการบ่ม (^o ซ.)	Q_u (กก./ซม ² .)	
			ที่ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	
			1	3
ดินหนองงูเห่า	6	27	6.81	7.09
		34	8.18	9.30
		60	13.13	21.80
ดินห่านทอง	6	27	5.87	6.28
		34	6.30	7.81
		60	9.44	13.74
ดินระนอง	6	27	4.57	5.27
		34	5.80	8.20
		60	12.39	17.48

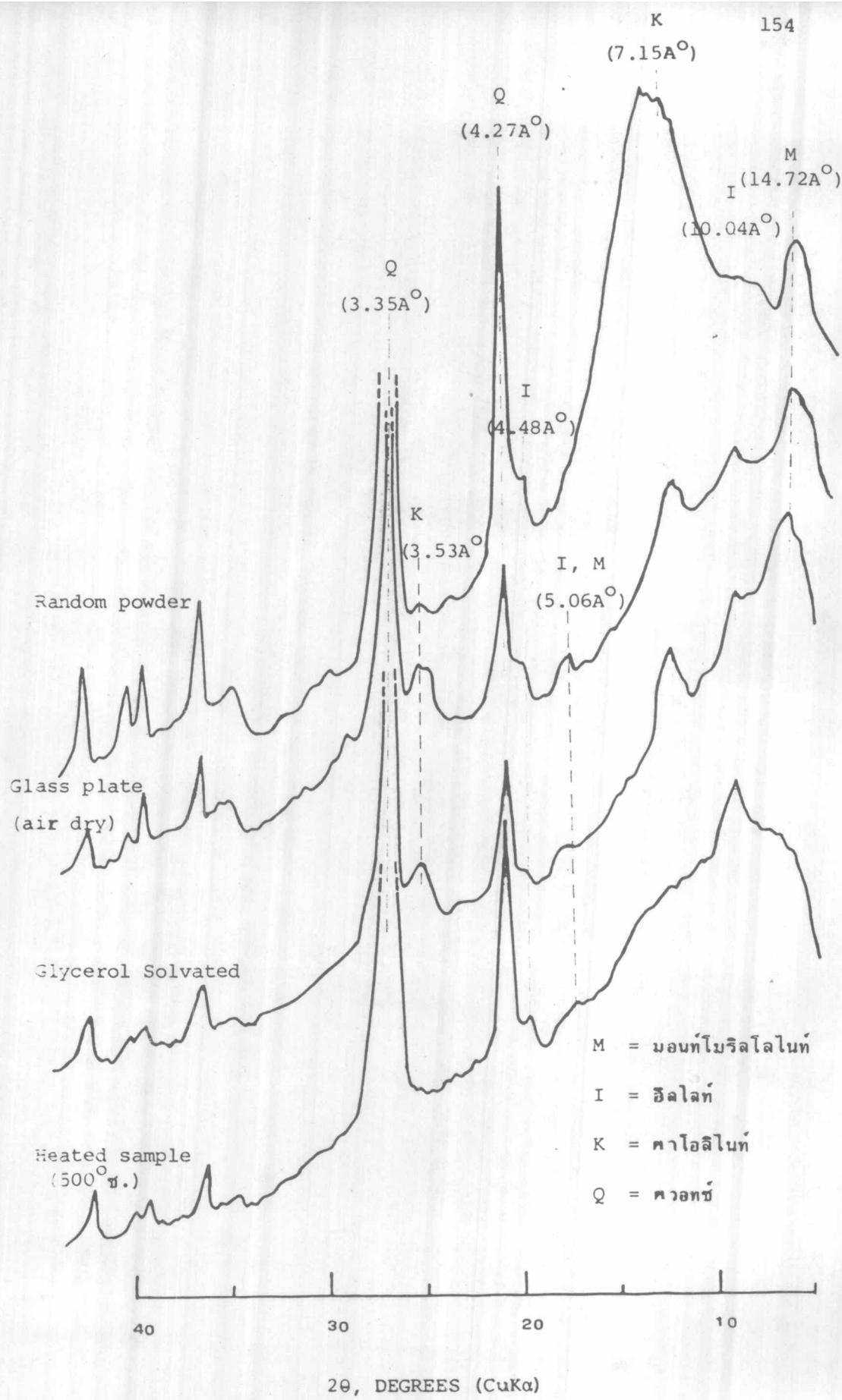
ตารางที่ ง.3 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรกต่าง ๆ

ชนิดดิน	ปริมาณปูนขาว (%)	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	Q_u (กก./ซม ² .) ที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรก (%)				
			14	16	18	20	24
ดินพานทอง	6	7	7.60	7.50	7.28	7.00	6.50
		30	8.44	8.35	8.25	8.25	7.72

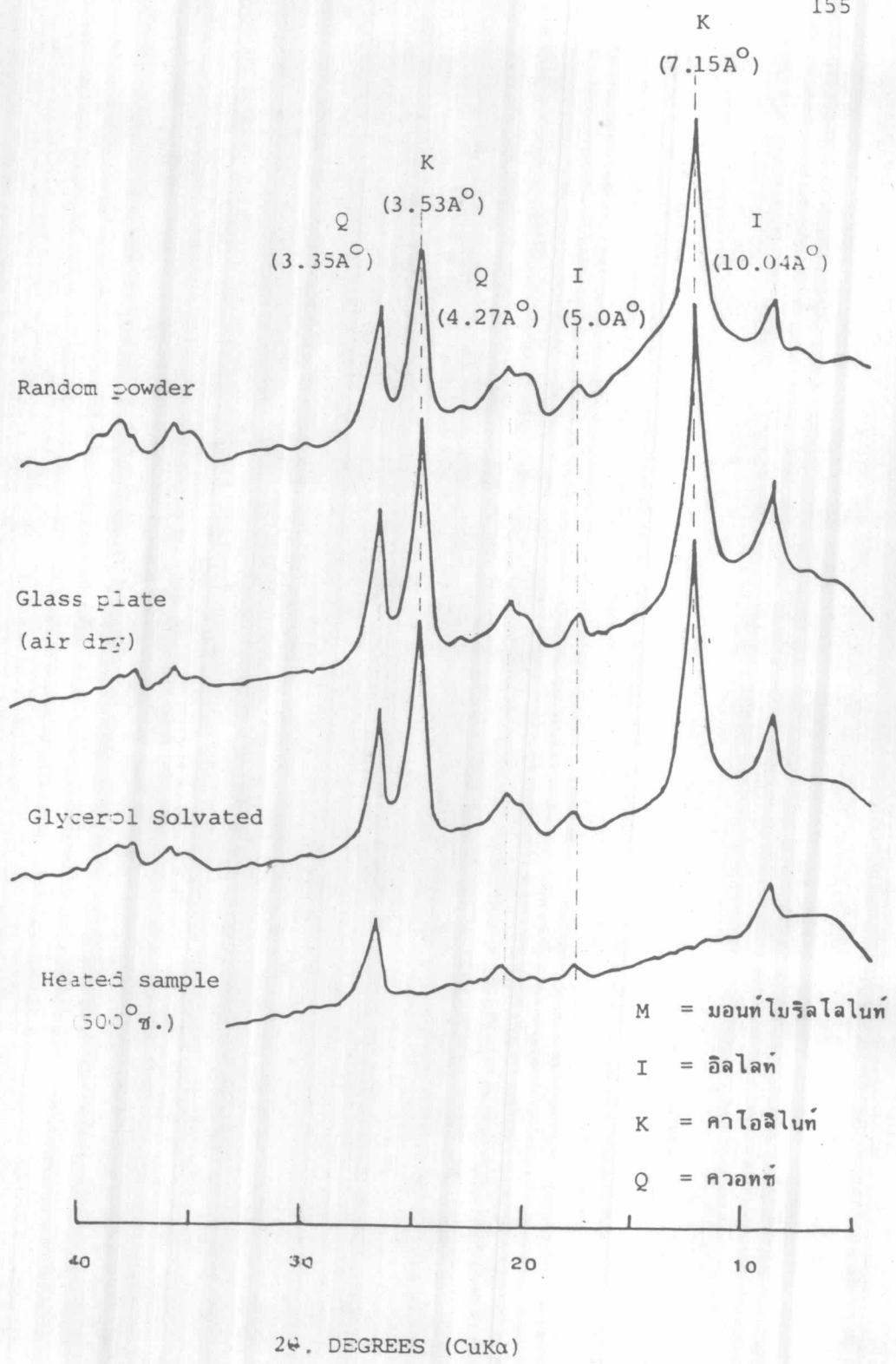
ชนิดดิน	ปริมาณปูนขาว (%)	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	Q_u (กก./ซม ² .) ที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรก (%)				
			18	22	26	30	32
ดินระนอง	6	7	7.55	7.60	8.0	7.90	8.01
		30	10.09	10.02	9.75	-	10.12

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ทราย-ปูนขาว 6 %

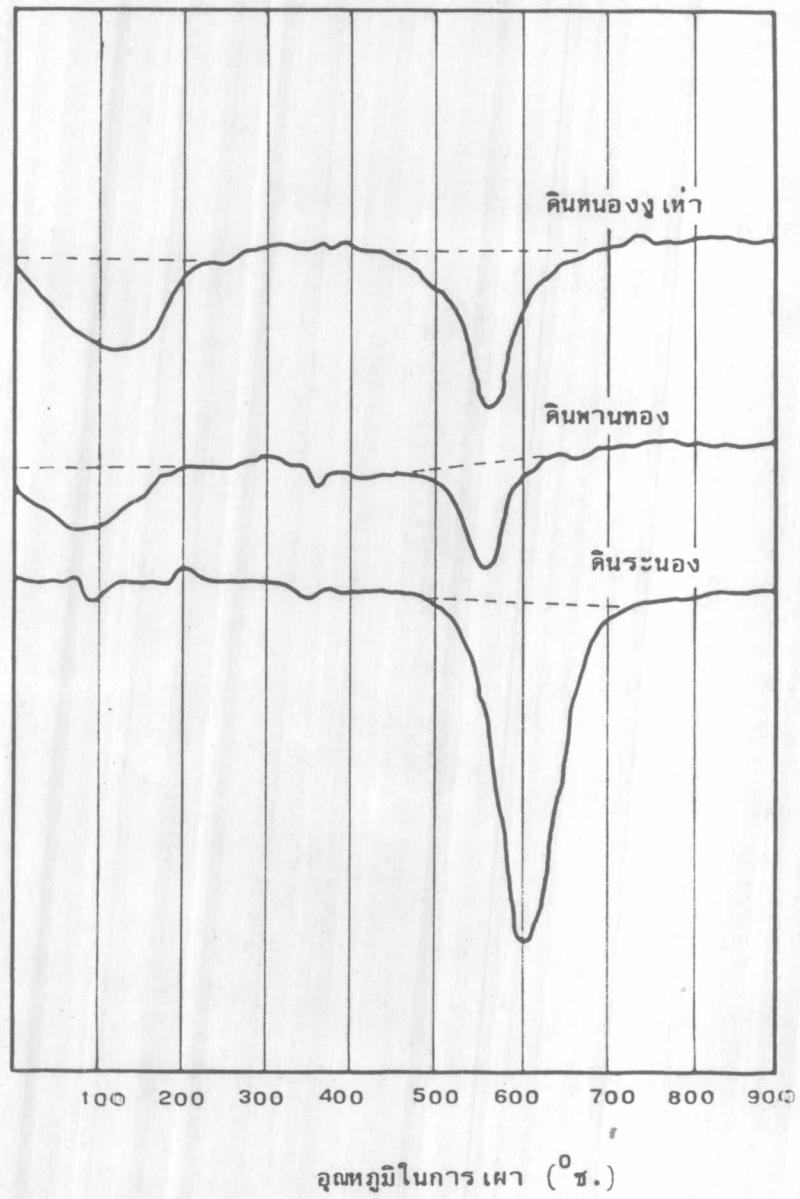
ชนิดดิน	อัตราส่วน ดิน: ทราย (โดยน้ำหนัก)	Q_u (กก./ซม ² .) ที่ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)		
		0	10	30
ดินหนองงูเห่า	100:0	6.85	7.95	9.81
	90:10	6.70	7.59	9.43
	80:20	6.40	7.25	7.94
	70:30	5.97	6.12	6.79
	60:40	5.08	5.22	6.05
ดินระนอง	100:0	4.21	7.30	8.66
	90:10	3.70	6.29	7.57
	80:20	2.53	5.51	6.50
	70:30	1.67	4.70	5.60
	60:40	0.99	3.82	5.72



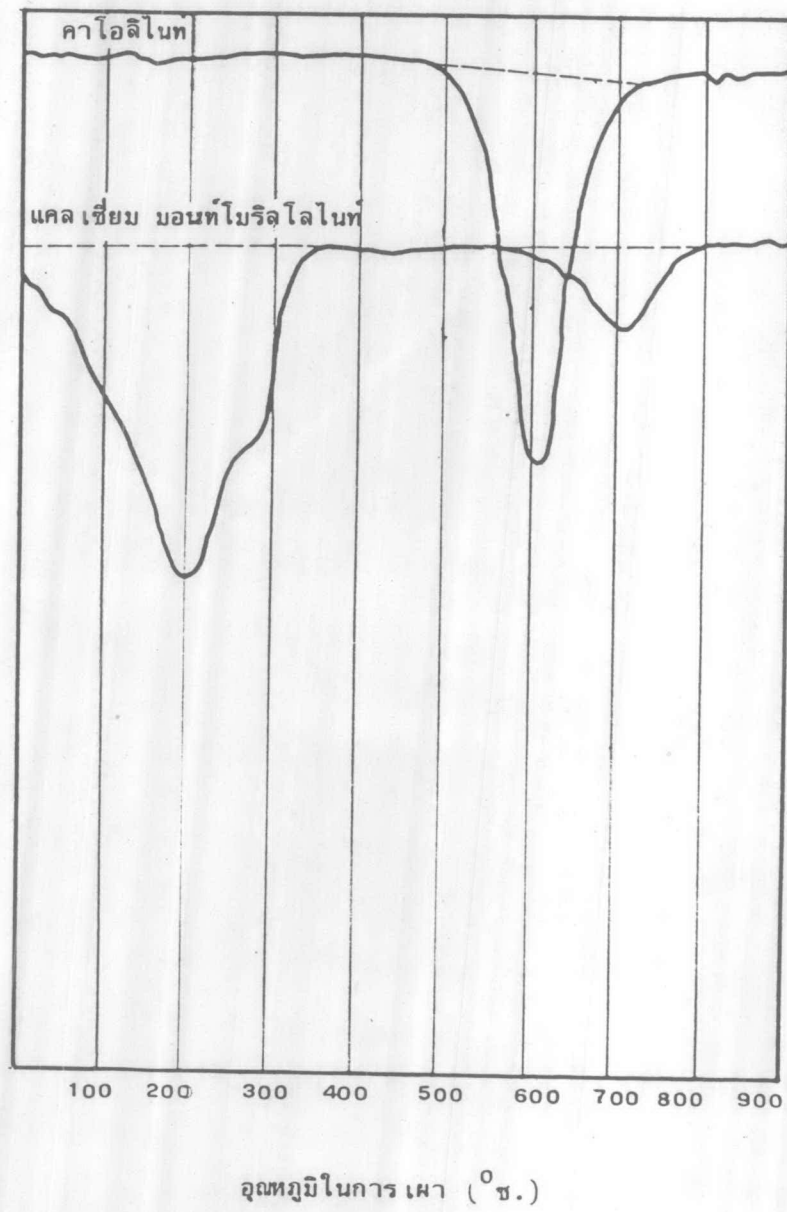
รูปที่ ง.2 X-ray diffraction pattern ของดินห่านทอง เมื่อเตรียมตัวอย่าง
ดินแบบต่าง ๆ



รูปที่ ๓.๓ X-ray diffraction pattern ของดินระนองเมื่อเตรียมตัวอย่าง
 ดินแบบต่าง ๆ



รูปที่ ง. 4 Thermogram ของดินเหนียวห้าวอย่างทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ ง.5 Thermogram ของแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์ที่ได้มาจากการทดลอง

ประวัติผู้เขียน

นายวิริยะ กิริติวิรัชการ เกิดเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2501 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใน พ.ศ. 2523 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา ในปีเดียวกัน ระหว่างศึกษาได้รับราชการอยู่ที่ฝ่ายคำนวณ กองแบบแผน กระทรวงสาธารณสุข

