รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปิยะสาร ประเสริฐธรรม , ศ.ดร., "หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530

ภาษาอังกฤษ

CHAMBERS,F.S., AND SHERWOOD,T.K., "Absorption of Nitrogen Oxides by Aqueous Solution, " , Industrial Engineering and Chemistry, vol 29 , p.1415 , 1937

CHARLES,L., BURDICK AND STANLEY FREED,E., "The Equilibrium between Nitric Oxide , Nitrogen Peroxide and Aqueous Solution of Nitric Acid, ", Journal of America Chemistry & Society , vol 43 , p.518 , 1921

DENBIGH, K.G., AND PRINCE, A.J., "Kinetics of Nitrous Gas Absorption in Aqueous Nitric Acid,", Journal of Chemical and society., p.790 , 1947

FOERSTER,F., AND KOCH, M., Angew. Chemistry., vol 21 , p.2161 , 1980

MILLER, D.N. , "Mass Transfer in Nitric Acid Absorption , " , AICHE Journal , vol 33 , no 8 , p.1351 , 1987

PIYASAN PRASERTHDAM, " CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'HYDRODYNAMIQUE ET DU TRANSFERT DE MATIERE DANS UNE COLONNE A BULLES EN ASCENSION LIBRE," Ph.D. Thesis, A L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 1979

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง

ภาคผนวก ก 1 ตารางข้อมูลการทดลองหาความเข้มข้นของคลอไรด์ในกรดที่ระยะเวลาต่างๆกัน

Time(t) min.	0.0282 N $AgNO_3$ used(ml.)	cl^- conc.(C) mol/lit	ΔC mol/lit
0	0.1	0.0005	0
2	0.3	0.0017	0.0012
4	0.95	0.0054	0.0049
6	1.25	0.0071	0.0066
8	1.4	0.0079	0.0074
10	1.2	0.0068	0.0063
12	1.2	0.0068	0.0063
14	1.6	0.0090	0.0085
16	1.15	0.0065	0.0060
18	1	0.0056	0.0051
20	1	0.0056	0.0051
22	1	0.0056	0.0051
24	1	0.0056	0.0051
26	0.6	0.0034	0.0029
28	0.4	0.0022	0.0017
30	0.3	0.0017	0.0012

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EX Cl^- conc. (C) = $\frac{AgNO_3 \text{ conc.} * AgNO_3 \text{ used (ml.)}}{\text{sample used (ml.)}}$

= (0.0282*0.1)/(5)

= 0.0005

ΔC = 0.0017-0.0005

= 0.0012

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 2 ข้อมูลการทดลองหาประสิทธิผลของหอดูดซึม NO_x ระดับอุตสาหกรรมที่สภาวะต่าง ๆ กัน

Gas Vel. FPM	Gas Flow Rate Nm^3/hr	Liquid Flow Rate l/min	Gas Inlet conc. ppm	Gas outlet Conc. ppm	Gas Inlet Temp. °C	Gas Outlet Temp. ° C	Acid Inlet Conc. mol/l	Acid Outlet Conc. mol/l	Acid Inlet Temp. ° C	Acid Outlet Temp. ° C
1,840	1,232	170.87	2900	1100	33	29	0.3359	0.3497	33	32
		254.20	2900	1000	33	29	0.2685	0.2746	33	32
		337.53	2900	820	33	29	0.2639	0.2731	33.3	32
		420.87	2200	700	33	29	0.2624	0.2685	32	32
		470.87	2550	800	33.3	29	0.2269	0.2365	32	32
1,600	1,072	252.10	2000	610	30	29	0.1302	0.1431	31	31
		335.43	1600	400	30	29	0.1327	0.1427	31	31
		418.77	1800	420	30	29	0.1342	0.1369	31	31
		468.77	2000	600	30	29	0.1348	0.1406	31	31
1,350	904	252.20	2200	850	35.8	34.2	0.3075	0.3131	36.6	36.1
		335.53	2200	500	35.8	34.2	0.3082	0.3113	36.6	36.1
		418.87	3000	550	35.8	34.2	0.2973	0.3082	36.6	36.1
		468.87	3000	480	35.8	34.2	0.3065	0.3078	36.6	36.1
1,600	1,072	466.67	5000	1500	32	34	1.0182	1.0259	35	35
			5000	1800	32	34	1.5455	1.5489	35	35
			6800	5000	34	32	4.9984	5.0009	32.2	32.2

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ข1 ตัวอย่างการคำนวณตามสมการของ ONDA

ข้อมูล

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอแพค	1,200	มม.
ความสูงแพคกิ้ง	4,000	มม.
แพคกิ้งเป็นชนิด Ceramic Intalox Saddle ขนาด 35 มม.		
ความดัน	1	bar
อัตราการไหลของก๊าซ	1,232	$Nm^3/hr.$
ความเข้มข้นของก๊าซทางเข้า	2,900	ppm
ความเข้มข้นของก๊าซทางออก	1,100	ppm
อุณหภูมิของก๊าซทางเข้า	33	o C
อุณหภูมิของก๊าซทางออก	29	o C
อัตราการไหลของของเหลว	170.87	l/min
ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เข้า	0.3359	mol/l
ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ออก	0.3497	mol/l
อุณหภูมิของกรดที่เข้า	33	o C
อุณหภูมิของกรดที่ออก	32	o C

ข้อสมมุติฐาน

1. ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในชั้นของเหลวด้านทาน
2. เป็นการดูดซึมที่อุณหภูมิคงที่ Isothermal
3. อยู่ในสภาวะคงที่ Steady State
4. ก๊าซที่ถูกดูดซึมเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ส่วนก๊าซอื่น ๆ ไม่ละลายน้ำ

คำนวณหา Mass Flowratae ของ Gas

$GV_2 = G*P_V/S$

$G = 1,232 \quad m^3/hr.$

$\rho_V = 1.2928 \quad kg/m^3$

$S = (\pi/4)*D^2$

$= (\pi/4)*(1.2)^2$

$= 1.131 \quad m^2$

$GV_2 = \frac{1,232*1.2928}{1.131*3600}$

$= 0.391 \quad kg/sec\ m^2$

คำนวณหา Mass Flowrate ของของเหลว

$GL_2 = L*P_L/S$

$L = 170.87 \quad l/min$

$\rho_L = 1.004 \quad kg/l$

$GL_2 = \frac{170.87*1.004}{1.131*60}$

$= 2.528 \quad kg/sec\ m^2$

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในเฟสก๊าซ

$$\frac{k_{g,loc}\ R\ T}{P} = (k_{g,loc})' = C_1 a_V D_V (G_V/a_V\mu_V)^{0.7} (\mu_V/\rho_V D_V)^{1/3} (a_V D_p)^{-2.0}$$

$C_1 = 5.23$ สำหรับแพคกิ้งขนาดใหญ่กว่า 0.0127 m.

$a_V = 194 \quad m^2/m^3$

D_v = 1.287×10^{-5} m^2/sec

μ_v = 1.82×10^{-5} $N\ s\ /m^2$

D_p = 0.0350 m.

R = 8314.3 J/kmol.K

P = 1.01×10^5 N/m^2

$$T = \frac{(33+29)}{2} + 273$$

$$= 304 \quad K$$

$$(k_{g,loc})' = (5.23*194*1.287x10^{-5})[0.391/(194*1.82x10^{-5})]^{0.7} [1.82x10^{-5}/(1.2928*1.287x10^{-5})]^{1/3} (194*0.0350)^{-2.0}$$

$$= 7.8771 \times 10^{-3} \quad m/s$$

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ในเฟสของเหลว

$$\frac{k_{l,loc}\ M_L}{\rho_L} = (k_{l,loc})' = 0.0051(\mu_L g/\rho_L)^{1/3}(G_L/a\mu_L)^{2/3}(\mu_L/\rho_L D_L)^{-1/2}(a_v D_p)^{0.4}$$

$$a/a_v = 1-\exp.[-1.45(\sigma_c/\sigma)^{0.75}(G_L/a_v\mu_L)^{0.1}(a_v G_L^2/g\rho_L^2)^{-0.05} (G_L^2/\rho_L\sigma a_v)^{0.2}]$$

σ_c = 0.061 N/m (ceramic)

μ_L = 9.033×10^{-4} $N\ s/m^2$

ρ_L = 1,004 kg/m^3

g = 9.81 m/s^2

D_L = 1.8×10^{-9} m^2/s

T = 32+273

= 305 K

$$6 = 0.1232\ [\ 1- 0.00146\ T\ ]$$

$$= 0.0683$$

$$a/194 = 1-\exp[(-1.45)(0.061/0.0683)^{0.75}\{2.528/(194*9.033\times10^{-4})\}^{0.1}$$

$$\{(2.528^2*194)/(1,004^2*9.81)\}^{-0.05}\{2.528^2/(1,004*0.0683*194)\}^{0.2}]$$

$$= 0.4415$$

$$a = 86 \quad m^2/m^3$$

และ $(k_{l,loc})' = (0.0051)[(9.033\times10^{-4}*9.81)/1,004]^{1/3}[2.528/(86*9.033\times10^{-4})]^{2/3}$

$$[9.033\times10^{-4}/(1,004*1.8\times10^{-9})]^{-1/2}\ (194*0.0350)^{0.4}$$

$$= 1.0335\times10^{-4} \quad m/s$$

<u>หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเฉพาะที่ในเฟสของเหลว</u>

$$\frac{1}{K_{L,loc}} = \frac{1}{(k_{l,loc})'} + \frac{1}{m(k_{g,loc})'}$$

เมื่อ m = Henry 's law constant

$$= 3.184\times10^4$$

$$\frac{1}{K_{L,loc}} = \frac{1}{(1.0335\times10^{-4})} + \frac{1}{(3.184\times10^4*7.8771\times10^{-3})}$$

$$= 9,675.86$$

$$K_{L,loc} = 1.0335\times10^{-4} \quad m/s$$

$$K_{L,loc}\ a = (1.0335\times10^{-4})(86)$$

$$= 8.8881\times10^{-3} \quad s^{-1}$$

$$= 0.5333 \quad min^{-1}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

τ_L = KV_1/L

K = 4

V_1 = 1,220.5 lit

L = 170.87 lit/min

τ_L = (4*1,220.5)/170.87

= 28.57 min

ดังนั้น $K_{L,loc}$ a τ_L = 0.5333*28.57

= 15.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข 2 ตัวอย่างการคำนวณตามสมการของ ศ.ดร. ปิยะสาร (Hydrodynamics Model)

จากสมการ

$$C_s = \frac{n}{(n+\beta)} C_e + Y \sum_{d=1}^{K} X^{d-1}\bar{C}_d^* + WX^K \sum_{m=1}^{j} Z^{m-1}\bar{C}^*_{K+m}$$

$$\frac{}{X^K Z^j - \{\beta/(n+\beta)\}}$$

เมื่อ $X = 1+K_LaT_1$ $\qquad Y = K_LaT_1$

จากแบบจำลองที่ $K = 4$, $m = 1$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $n = 1$, $j = 0$

จะได้ว่า $$C_s = C_e + K_LaT_1 \sum_{d=1}^{4} X^{d-1}\bar{C}_d^* + 0$$

$$\frac{}{X^4 - 0}$$

$$C_e = C_sX^4 - (X-1)[\bar{C}_1^* + X\bar{C}_2^* + X^2\bar{C}_3^* + X^3\bar{C}_4^*]$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$(C_s-\bar{C}_4^*)X^4 + (\bar{C}_4^* - \bar{C}_3^*)X^3 + (\bar{C}_3^* - \bar{C}_2^*)X^2 + (\bar{C}_2^* - \bar{C}_1^*)x + (\bar{C}_1^* - C_e) = 0$$

แทนค่า $C_e = 0.3359$ mol/l , $C_s = 0.3497$ mol/l , $\bar{C}_1^* = 4.27*10^{-6}$

$\bar{C}_2^* = 3.49*10^{-6}$, $\bar{C}_3^* = 2.71*10^{-6}$, $\bar{C}_4^* = 1.92*10^{-6}$

จากการแก้สมการจะได้ค่า X ออกมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$X = 1 + K_L a \tau_1$$

$$= +- 0.99$$

$$K_L a \tau_1 = 0.01$$

และ $\tau_L = 4 * \tau_1$

ดังนั้น $K_L a \tau_L = 4 * K_1 a \tau_1$

$$= 0.0400$$

$$\tau_L = 28.57 \text{ min}$$

ดังนั้น $K_L a = 0.0400/28.57$

$$= 0.00140 \text{ min}^{-1}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข 3 ตัวอย่างการคำนวณตามสมการของ Miller

จากสมการที่ (20)

$$R(3) = H_{N2O4} \sqrt{k_{4,5} D_{N2O4}} A [P_{N2O4} - (P_{NO}/K0)^{2/3}] \quad (20)$$

R(3) = Absorption rate

= Liquid flowrate * (Acid outlet conc. - Acid inlet conc.)

$$= \frac{170.87 \text{ (l/min)} * (0.3497 - 0.3359) \text{(mol/l)}}{60 \text{(sec/min)} * (1{,}000 \text{ mol/kmol})}$$

$= 3.9300 \times 10^{-5}$ kmol/sec

A = a S H

= 86*1.131*4

= 389 m^2

P_{NO2} = Gas conc. * Total Pressure

= 1100×10^{-6} * 101.33 kPa

= 0.1115 kPa

T = 29 + 273

= 302 K

จากสมการที่ 2

$$K_2 = P_{N2O4} / P^2_{NO2}$$

$$= \exp.\left(\frac{6{,}893}{T} - 25.865\right) \quad (2)$$

ดังนั้น $P_{N2O4} = P^2_{NO2} \exp(\frac{6,893}{302} - 25.865)$

$= 5.9440 \times 10^{-4}$ kPa

จากกราฟรูปที่ 2.1 ที่ความเข้มข้นของกรด 2.19 % , อุณหภูมิ 33^{o} C

จะได้ $k_9 = \log (P_{NO} / P^3_{NO2})$

$= 9$

ดังนั้น $P_{NO} = (\text{Anti log } k_9)(P_{NO2})^3$ atm

$= (\text{Anti log } 9) (1100 \times 10^{-6})^3$

$= 1.331$ atm

$= 1.331 * 101.33$

$= 134.87$ kPa

จากสมการที่ (4)

$K0 = \exp.(23.39 - 134.98 W_{HNO3} + 434.69 W^2_{HNO3} - 789.84 W^3_{HNO3} + 675.65 w^4_{HNO3} - 221.89 W^5_{HNO3})$

$W_{HNO3} = 0.0219$

$K0 = 1,004,909,809$ $kPa^{-1/2}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจาก

$$H_{N2O4}\sqrt{k_{4,5}\,D_{N2O4}} = \frac{R(3)}{A[P_{N2O4} - (P_{NO}/K0)^{2/3}]}$$

$$= \frac{3.9300 \times 10^{-5}}{(389)[(5.9440\times10^{-4})-(134.87/1,004,909,809)^{2/3}]}$$

$= 1.7781\times10^{-4}$ kmol/m^2 kPas

H_{N2O4} $= 1.7006\times10^{-5}$ kmol/m^3 kPa

$$\sqrt{k_{4,5}\,D_{N2O4}} = \frac{1.7781\times10^{-4}}{1.7006\times10^{-5}}$$

K_L $= 10.46$ m/s

$K_L a$ $= 10.46*86$

$= 899.56$ s^{-1}

$= 53,974$ min^{-1}

$K_L a\,\tau_L$ $= 53,974*28.57$

$= 1.542\times10^{6}$

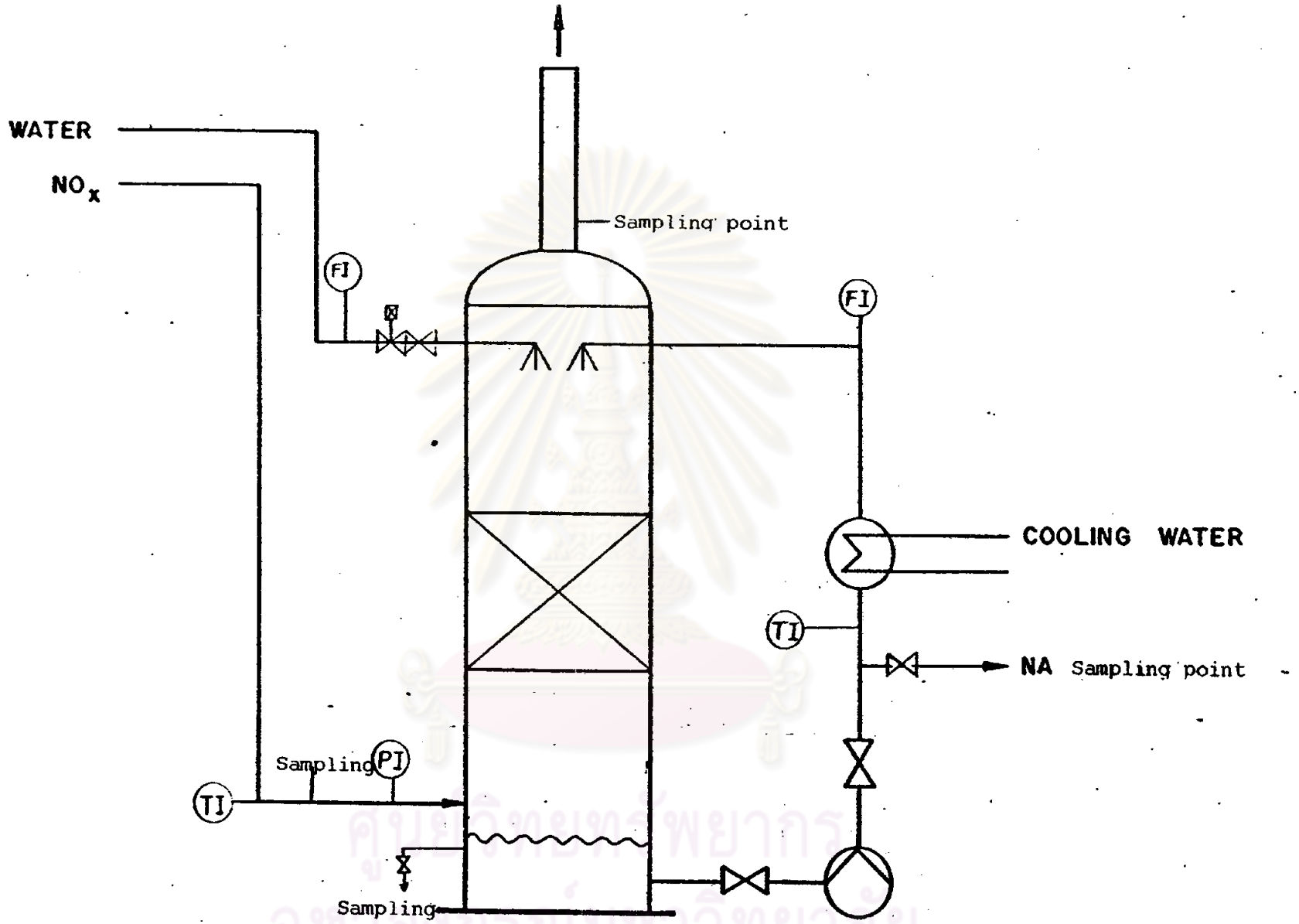
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาประสิทธิภาพ (η)

$$\eta = \frac{(\text{ความเข้มข้นของก๊าซที่เข้า}-\text{ความเข้มข้นของก๊าซที่ออก})\times100}{\text{ความเข้มข้นของก๊าซที่เข้า}}$$

$$= \frac{(2900\times10^{-6}) - (1100\times10^{-6})}{(2900\times10^{-6})} \times 100$$

$= 62.07$ %



FLOW DIAGRAM

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นาย อดิชาต วงศ์กอบลาภ เกิดวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2507 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีวิศวกรรม) ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2528 เริ่มทำงานที่ บริษัท ไนโตรเคมีอุตสาหกรรม จำกัด ตั้งแต่จบการศึกษาจนกระทั่งปัจจุบัน ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (ภาคนอกเวลาราชการ) ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2534

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย