เอกสารอ้างอิง

1.Luyben, W.L. **Practical Distillation Control.** New York : Van Nostrand Reinnold, 1992.

2.Quintero-Marmol, E., Luyben, W.L., and Georgakis,C. 1991. Application of an extended Luenberger observer to the control of multicomponent batch distillation. **Ind. Eng. Chem. Res.** 30: 1870-1880.

3. Yu, C. C., Luyben, W. L. Control of Multicomponent Distillation Columns Using Rigorous Composition Estimators. **Distillation and Absorption1987.** 1987-A29. ; Inst. of Chem. Eng. Symposium Series No.104; Inst. of Chem. Eng.; London.

4. Roffel, B., and Chin, P. **Computer Control in the Process Industries.** New York : Lewis Publishers, 1987.

5. Frank L. Lewis, **Applied Optimal Control and Estimation.** New Jersey : Prentic-Hall International, 1992.

6. ICONICS, Inc. **GENESIS User's Reference Guide** Version 3.6 Book 1&2 : Genesis Control Series, 1993.

7. Quintero-Marmol, E. and Luyben ,W.L. 1992. Inferential model-based control of multicomponent batch distillation. **Chem.Eng.Sci.** 47(4): 887-898.

8. Ray, W.,H. (1981), Advanced Process Control, **Chemical Engineering Series**, McGraw-Hill: New York.

9.Saadat, H. (1993), **Computational Aids in Control Systems Using MATLAB**, McGraw-Hill : New York.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติของเอทธิลแอลกอฮอล์และน้ำ

Chemical formula	C_2H_5OH	H_2O
M.W.	46.069	18.015
BP. at 20 °C (C/ K)	78.4 / 351.5	100 / 373.2
Density at 20 °C (kg/m^3)	789	1,000
Latent heat of vaporization (J/gmole)	33,460	41,590
SG. at 20 °C	0.789	1
Antoine coeff. A (ANTA)	18.9119	18.3036
Antoine coeff. B (ANTB)	3,803.98	3,816.44
Antoine coeff. C (ANTC)	-41.68	-46.13
T_c (K)	516.2	647.3
P_c (atm)	63	217.6
α_{ij} เฉลี่ย	2.304	1

โดยที่สมการ Antonine คือ

$$\ln(VP)_i = ANTA_i - \frac{ANTB_i}{T - ANTC_i}$$

เมื่อ VP_i = ความดันไอของสาร i มีหน่วยเป็นบรรยากาศ

T = อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลสมดุลของระบบเอทานอล-น้ำ ที่ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ

อุณหภูมิ (C)	X	Y
100	0	0
95.5	0.019	0.17
89	0.0721	0.3891
86.7	0.0966	0.4375
85.3	0.1238	0.4704
84.1	0.1661	0.5089
82.7	0.2337	0.5445
82.3	0.2608	0.558
81.5	0.3273	0.5826
80.7	0.3965	0.6122
79.8	0.5079	0.6564
79.7	0.5198	0.6599
79.3	0.5732	0.6841
78.74	0.6763	0.7385
78.41	0.7472	0.7815
78.15	0.8943	0.8943

เมื่อ X = อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลในของผสมเหลว

Y = อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลในไอของของผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

แสดงการหาค่าเมตริก A, B และ C สำหรับสมการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นของคอลัมน์หอกลั่นแบบกะของสาร 2 องค์ประกอบ

เวกเตอร์สภาวะ :

$$\mathbf{x} = \left[x_{B,1} x_{11} x_{21}, \ldots x_{N_t,1} x_{D1} \right]^T$$

ตัวห้อยตัวแรกแสดงจำนวนขั้นและตัวห้อยตัวที่สองแสดงจำนวนองค์ประกอบ เลขแสดงจำนวนขั้นในหอกลั่นนับจากส่วนล่างขึ้นบน หม้อต้มไอน้ำคือขั้น B และหม้อเก็บรีฟลักซ์คือขั้น D ค่าตัวแปรสภาวะที่แสดงเป็นขององค์ประกอบที่หนึ่งเท่านั้นเพราะตัวแปรสภาวะของตัวแปรที่สองได้มาจากการนำอัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบที่หนึ่งมาลบออกจากหนึ่ง

a_{ij} ของกระบวนการในเมตริก A แสดงไว้ดังนี้

ขั้นที่ 1 (หม้อต้มไอน้ำ) :

$$a_{11} = \frac{-R + V(1 - Kv_B)}{H_B}$$

$$a_{12} = R / H_B$$

ขั้นที่ i :

$$a_{i+1,i} = (V / H_i) Kv_{i-1}$$

$$a_{i+1,i+1} = -(R + VKv_i) / H_i$$

$$a_{i+1,i+2} = R / H_i$$

ขั้นที่ N (หม้อเก็บรีฟลักซ์) :

$$a_{N,N-1} = (V / H_D) Kv_{N_t}$$

$$a_{N,N} = -V / H_D$$

b_i ของเมตริก B ได้มาจาก

ขั้นที่ 1 (หม้อต้มไอน้ำ) : $$b_{B,1} = \frac{(x_{1,t} - x_{B,t}) + (x_{1,ss} - x_{B,ss})}{2 * H_B}$$

ขั้นที่ i : $$b_{i,1} = \frac{(x_{i+1,t} - x_{i,t}) + (x_{i+1,ss} - x_{i,ss})}{2 * H_i}$$

ขั้นที่ N (หม้อเก็บรีฟลักซ์) : $b_{D,1} = 0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ทดสอบความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออก

(Observability checking)

```
>> A = [ a11  a12  a13  ...  a1n
         a21  a22  a23  ...  a2n
          :    :
         ann  an1  an3  ...  ann ] ;

>> C = [ c11  c12  c13  ...  c1n
         c21  c22  c23  ...  c2n
          :    :
         cm1  cm1  cm3  ...  cmn ] ;

>> [ m,n ] = size ( A );
>> ob = C;
>> for i = 1: n-1
>>       ob = [ C; ob*A ];            % ob = Observability matrix
>> end
>> if rank ( ob ) ~ = n
>>       disp ( 'System is not state observable' )
>> else
>>       disp ( 'System is state observable' )
>> end
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้หาเมตริกเกนวงจรปิดของออบเซิร์ฟเวอร์ ด้วยวิธี Pole-Placement

(MATLAB program to find Closed-loop matrix gains by Pole-Placement method)

```
>> A = [ a11  a12  a13  ...  a1n
         a21  a22  a23  ...  a2n
          :    :
         ann  an1  an3  ...  ann ] ;

>> C = [ c11  c12  c13  ...  c1n
         c21  c22  c23  ...  c2n
          :    :
         cm1  cm1  cm3  ...  cmn ] ;

>> P = [ p11  p12  p13  ...  p1n ] ;     % desired closed-loop ploes
>> K = place ( A',C',P ).'               % K = observer gains
>> O = eig ( A - K*C ).'                 % back checking of closed loop poles
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้หาเมตริกเกนวงจรปิดของออบเซิร์ฟเวอร์ด้วยวิธี Linear Quadratic Estimator

(MATLAB program to find Closed-loop matrix gains by Linear Quadratic Estimator method)

>> A = [a_{11} a_{12} a_{13} ... a_{1n}

a_{21} a_{22} a_{23} ... a_{2n}

: :

a_{nn} a_{n1} a_{n3} ... a_{nn}] ;

>> C = [c_{11} c_{12} c_{13} ... c_{1n}

c_{21} c_{22} c_{23} ... c_{2n}

: :

c_{m1} c_{m1} c_{m3} ... c_{mn}] ;

>> q = q_{ij} * eye(n); % process noise covariance

>> r = r_{ij} * eye(m); % measurement noise convariance

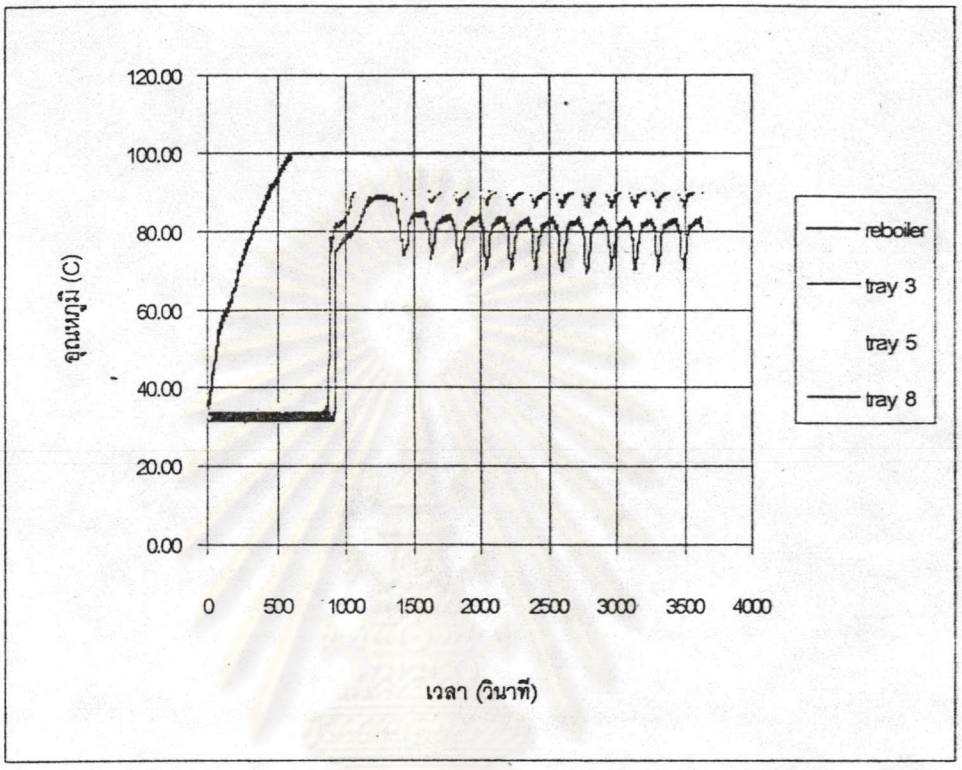
>> g = g_{ij} * eye(n);

>> [l,p,e] = LQE (a,g,c,q,r)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

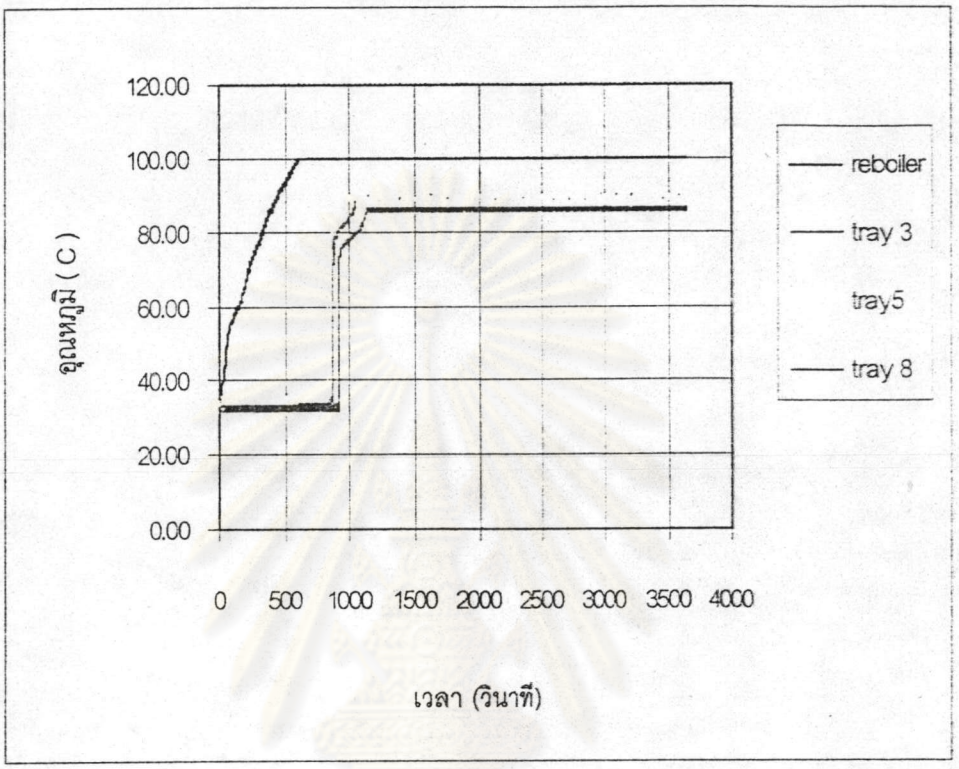
กราฟแสดงอุณหภูมิการกลั่นจริงที่ความเข้มข้นของของผสมน้ำ-แอลกอฮอล์ 15 %



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ

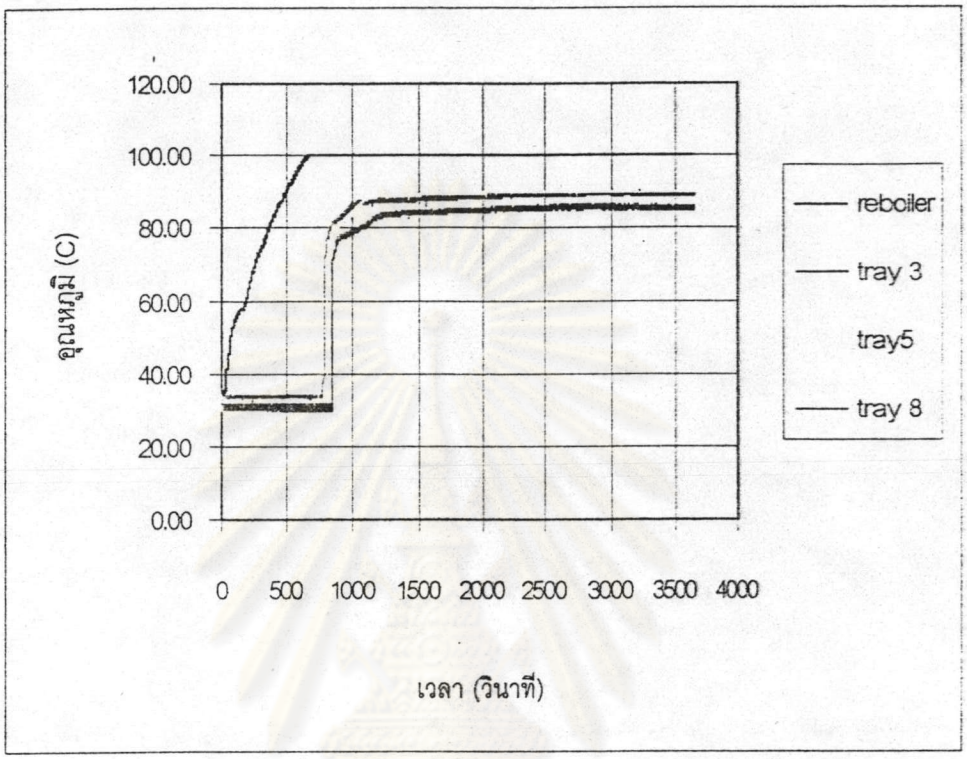
กราฟแสดงอุณหภูมิการกลั่นเฉลี่ยที่ความเข้มข้นของของผสมน้ำ-แอลกอฮอล์ 15 %



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฌ

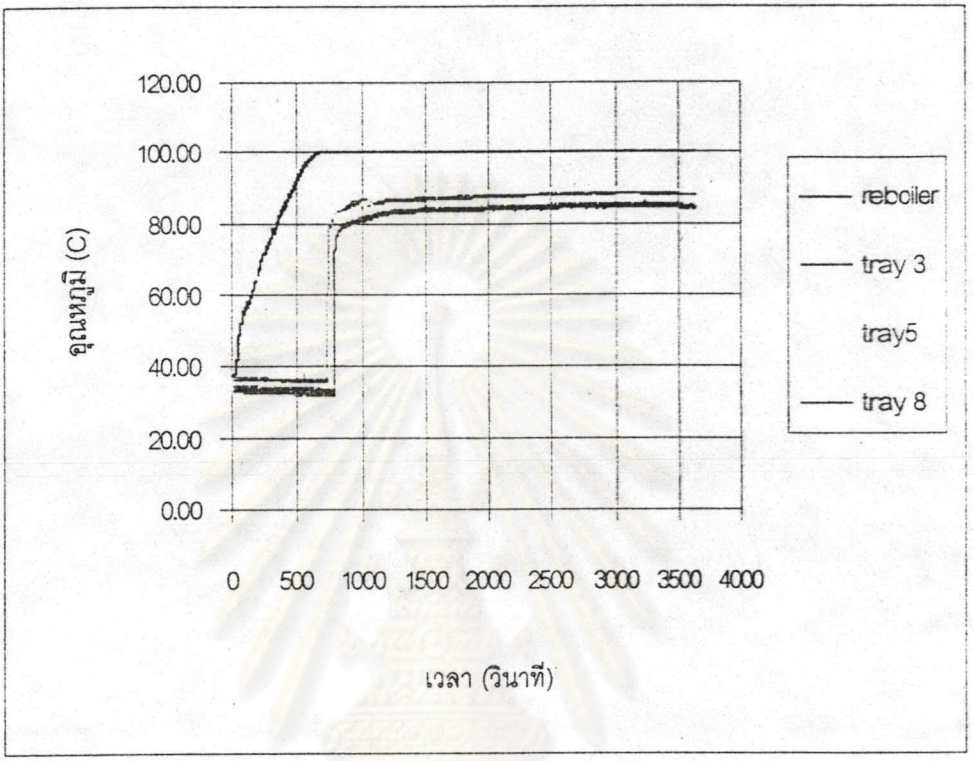
กราฟแสดงอุณหภูมิการกลั่นจริงที่ความเข้มข้นของของผสมน้ำ-แอลกอฮอล์ 25 %



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ

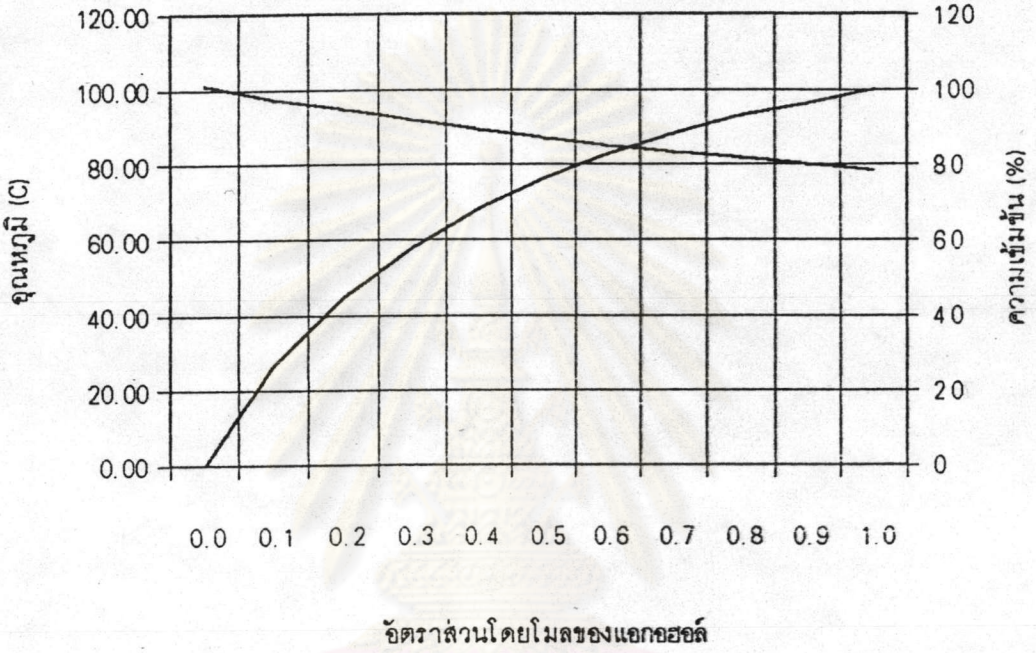
กราฟแสดงอุณหภูมิการกลั่นจริงที่ความเข้มข้นของของผสมน้ำ-แอลกอฮอล์ 35 %



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฎ

กราฟแสดงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การหาจุดเดือดเฉลี่ยของของผสมน้ำ-แอลกอฮอล์, $T_{b,mix}$

$T_{b,H2O}$ = 100 °c $T_{b,al}$ = 78.4 °c

เตรียมของผสมความเข้มข้น 25% โดยปริมาตร คิดเป็น mole fraction 0.09

$T_{b,mix}$ = (0.09*78.4)+(0.91*100)

= 98.056 °c

2. การหาค่าความสามารถในการกลายเป็นไอ, α_{ij}

จาก สมการ $\ln(VP_j) = ANTA - \frac{ANTB}{T - ANTC}$ และ $\alpha_{ij} = VP_i / VP_j$

VP = ความดันไอ (บรรยากาศ)

ANTA = ค่าคงที่แอนโทนีนเอ

ANTB = ค่าคงที่แอนโทนีนบี

ANTC = ค่าคงที่แอนโทนีนซี

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

อุณหภูมิ (K)	VP ethanol	VP water	α_{ij}
323	219.204	91.778	2.388
328	277.587	117.200	2.368
333	348.683	148.394	2.350
338	434.630	186.378	2.332
343	537.815	232.295	2.315
348	660.885	287.418	2.299
353	806.759	353.164	2.284
358	978.643	431.092	2.270
363	1180.032	522.914	2.257
368	1414.728	630.501	2.244
373	1686.841	755.884	2.232

α_{ij} เฉลี่ย = 2.304

3. การหาจำนวนโมลของไอของของผสมที่ระเหย, V

ไอน้ำอิ่มตัวที่ความดัน 1 bar มีพลังงาน 48,159 J/gmole

แอลกอฮอล์ มี ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ 33,460 J/gmole

น้ำ มี ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ 41,590 J/gmole

∴ ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอเฉลี่ยคิดที่ค่าความเข้มของของผสม 25%

$= (0.09*33,460) + (0.91*41,590)$

$= 40,858.3$ J/gmole

K_v ของวาล์ว = 1.4 m^3/hr

ปริมาตรจำเพาะ(sp. volume) ที่ความดัน 1 bar = 1.679 m^3/kg

∴ อัตราการไหลของไอน้ำ $= (1.4\ m^3/hr)*(1/1.679\ kg/m^3)*(1000\ g/kg)*(1/18 mole/g)$

$= 46.324$ gmole/hr

∴ ไอน้ำมีพลังงาน $= 46.324*48,159 = 2.23*10^6$ J/hr

∴ ไอของของผสมระเหยได้ $= \frac{2.23*10^6}{40,858.3} = 54.60$ gmole/hr

4. Liquid hold up ที่เครื่องควบแน่น, H_D

มวลโมเลกุลของน้ำ, $Mwt_{H2O} = 18$

มวลโมเลกุลของแอลกอฮอล์, $Mwt_{al} = 46$

ความหนาแน่นของน้ำ, $\rho_{H2O} = 1$ g/cm^3

ความหนาแน่นของแอลกอฮอล์, $\rho_{al} = 0.789$ g/cm^3

∴ ความหนาแน่นเฉลี่ย (ρ_{avg}) ที่ mole fraction 0.5

$= (0.5*0.789) + (0.5*1) = 0.8945$ g/m^3

∴ มวลโมเลกุลเฉลี่ย (Mwt_{avg}) ที่ mole fraction 0.5

$= (0.5*18) + (0.5*46) = 32$

hold up ใน reflux drum สูง 3 cm

เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลั่น 8 cm^2

∴ ปริมาตร hold up $= \pi (8/2)^2*3 = 150.796$ cm^3

∴ hold up, H_D $= (150.796\ cm3)*(0.8945\ g/cm3)*(1/32\ mole/g)$

$= 4.215$ mole

5. Liquid hold up ในแต่ละชั้นของหอกลั่น, H_i

hold up ในแต่ละชั้นสูง 1 cm

$\therefore$ ปริมาตร hold up $= \pi (8/2)^2 * 1 = 50.265 \quad cm^3$

$\therefore$ hold up, H_i $= (50.265\ cm3) * (0.8945\ g/cm3) * (1/32\ mole/g)$

$= 1.405 \quad mole$

6. Liquid hold up ในหม้อต้มไอน้ำ, H_B

feed 25 ลิตร ที่ความเข้น 25 % แอลกอฮอล์

$\therefore$ คิดเป็นแอลกอฮอล์ $= \frac{25{,}000 * 0.25 * 0.789}{46} = 107.20 \quad mole$

น้ำ $= \frac{25{,}000 * 0.75}{18} = 1041.67 \quad mole$

$H_{BO} = 1{,}148.87 \quad mole$

$H_{BF} = H_{BO} - \sum H_i - H_D$

$= 1{,}148.87 - 10 * 1.405 - 4.21 = 1{,}130.61 \quad mole$

$H_{B,avg} = \frac{1{,}148.87 + 1{,}130.61}{2} = 1{,}139.74 \quad mole$

7. หาสมาชิกในเมตริก A

$$K_{vi} = \frac{\alpha}{(1+(\alpha-1)x_i)^2} = \frac{2.304}{(1+(2.304-1)*0.5)^2} = 0.844$$

V และ R_s คิดเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลองจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล

$$V = R_s = \frac{54.6}{2} = 27.3 \quad mole$$

$$a_{11} = \frac{-R_s + V(1 - K_v)}{H_B} = \frac{-27.3 + 27.3(1-0.844)}{1{,}139.74} = -0.020$$

$$a_{12} = \frac{R_s}{H_B} = \frac{27.3}{1{,}139.74} = 0.024$$

$$a_{i+1,i} = \frac{VK_v}{H_i} = \frac{27.3 * 0.844}{1.405} = 16.404$$

$$a_{i+1,i+1} = \frac{-(R_s + VK_v)}{H_i} = \frac{-(27.3 + 27.3 * 0.844)}{1.405} = -35.835$$

$$a_{i+1,i+2} = \frac{R_s}{H_i} = \frac{27.3}{1.405} = 19.4306$$

$$a_{D,9} = \frac{VK_v}{H_D} = \frac{27.3*0.844}{4.215} = 5.468$$

$$a_{D,D} = \frac{-V}{H_D} = \frac{-27.3}{4.215} = -6.4769$$

8. หา elememt ในเมตริก C

$XX = 1+(\alpha-1)x_m = 1+(2.304-1)*0.5 = 1.65$

$b_{11} = -ANTB = -3,803.98$

$b_{21} = ANTA = 18.9119$

$P = 760$ mm.Hg.

$$c_i = \frac{b_{11}(a-1)}{XX[\ln(\frac{aP}{XX}) - b_{21}]^2} = \frac{-3,803.98*(2.304-1)}{1.65[\ln(\frac{2.304*760}{1.65}) - 18.9119]^2}$$

$= -21.041$

9.หา element ในเมตริก B

$$b_i = \frac{(X_{i+1,15\,min} - X_{i,15\,min}) + (X_{1+1,ss} - X_{i,s})}{2*H_i} \quad ; b_{10} = 0$$

$X_{1,15\,min} = 0.499$	$X_{1,ss} = 0.494$	$b_1 = 0.00009$
$X_{2,15\,min} = 0.500$	$X_{2,ss} = 0.692$	$b_2 = 0.05267$
$X_{3,15\,min} = 0.502$	$X_{3,ss} = 0.838$	$b_3 = 0.03167$
$X_{4,15\,min} = 0.506$	$X_{4,ss} = 0.923$	$b_4 = 0.1744$
$X_{5,15\,min} = 0.513$	$X_{5,ss} = 0.965$	$b_5 = 0.01139$
$X_{6,15\,min} = 0.526$	$X_{6,ss} = 0.984$	$b_6 = 0.01139$
$X_{7,15\,min} = 0.549$	$X_{7,ss} = 0.993$	$b_7 = 0.01495$
$X_{8,15\,min} = 0.587$	$X_{8,ss} = 0.997$	$b_8 = 0.02028$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$X_{9,15\ min} = 0.642$ $X_{9,ss} = 0.999$ $b_9 = 0.02456$

$X_{10,15\ min} = 0.711$ $X_{10,ss} = 0.999$ $b_{10} = 0$

10. ลดอันดับของระบบลงเหลือ 8 โดยไม่คิดชั้นที่ 1 และ 2 เนื่องจากเป็นชั้นที่ไม่มีเทอร์โมคัปเปิลติดต้องอยู่ ตรวจสอบความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรสภาวะโดยใช้ค่าตัวแปรขาออกโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ในภาคผนวก ง

11.คำนวณค่าอัตราการขยายวงจรปิดของระบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปMATLABในภาคผนวก จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายปริญญวัฒน์ ธงศรีเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วุฒิการศึกษา ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม สายวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง เมื่อปี พ.ศ. 2535 ได้รับทุนผู้ช่วยสอนในระดับปริญญามหาบัณฑิต และได้รับทุนจากบัณฑิตวิทยาลัยในการวิจัยครั้งนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย