

Institutt for kjemisk prosessteknologi

## Eksamensoppgave i TKP4105 Separasjonsteknologi

Faglig kontakt under eksamen: May-Britt Hägg Tlf: 930 80834

Sigurd Skogestad Tlf: 913 71669 (på reise)

Eksamensdato: 16.12.16

Eksamenstid (fra-til): 09:00 – 13:00

Hjelpemiddelkode/Tillatte hjelpemidler: Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler  
tillatt. Bestemt enkel kalkulator tillatt (kode D)

Annen informasjon:

Målform/språk: Bokmål / Nynorsk

Antall sider: 5

Antall sider vedlegg: 2 (som skal leveres med besvarelsen)

mm-papir er muligens nødvendig for oppgave 1

Kontrollert av:

12/12/2016   
Dato Sign

Merk! Studenter finner sensur i Studentweb. Har du spørsmål om din sensur må du kontakte instituttet ditt. Eksamenskontoret vil ikke kunne svare på slike spørsmål.

## Oppgave 1 / Oppgave 1 (Ekstraksjon, 25%)

(Benytt ark gitt i Vedlegg 1 til å løse oppgaven eller mm-papir)

Vi har en føde på 1 kg/s med 26.5 vekt-% eddiksyre og 73.5% vann ( $L_0$ ) som er vanskelig å separere med destillasjon. Istedet skal det brukes ekstraksjon med 1 kg/s isopropyleter ( $V_0$ ).

(a) Bruk data i tabellen til å tegne ferdig trekantdiagrammet (tegn inn aksetekst, tie lines, tofaseområde) for systemet vann-eddiksyre-isopropyleter (se eget ark bakerst som du kan rive av og lever inn sammen med besvarelsen)

(b) Tegn et flytskjema for ett-trinns ekstraksjon. Hva er mengde og sammensetning av produktene ( $L_1$  og  $V_1$ )?

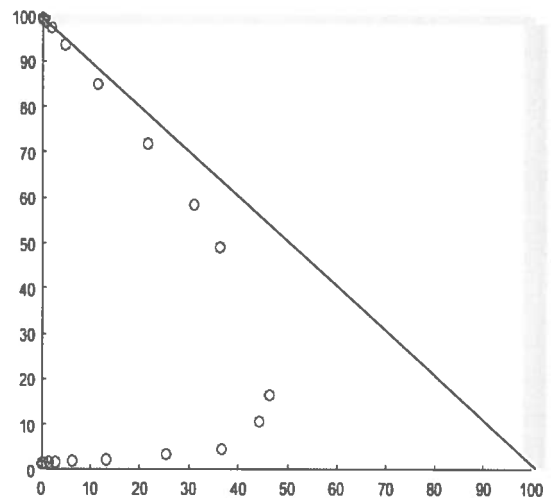
(c) Tegn et flytskjema for 5-trinns motstrøms ekstraksjon. Vi ønsker et vannprodukt ( $L_5$ ) med 1% eddiksyre. Hva er  $\Delta$  definert som og hvor er  $\Delta$ -punktet for denne separasjonen (omtrentlig plassering på trekantdiagram er tilstrekkelig). Er det mulig å få til den ønskede separasjonen med 1 kg/s isopropyleter og 5 trinn (se også neste delspørsmål)?

(d) Hva er minimum mengde isopropyleter ( $V_{0,min}$ ) som trenges dersom det er gitt at vannproduktet skal inneholde 1% eddiksyre (med uendelig mange likevektstrinn)?

A.3-24 Acetic Acid–Water–Isopropyl Ether System, Liquid–Liquid Equilibria at 293 K or 20°C

Water Layer (wt %)			Isopropyl Ether Layer (wt %)		
Acetic Acid	Water	Isopropyl Ether	Acetic Acid	Water	Isopropyl Ether
0	98.8	1.2	0	0.6	99.4
0.69	98.1	1.2	0.18	0.5	99.3
1.41	97.1	1.5	0.37	0.7	98.9
2.89	95.5	1.6	0.79	0.8	98.4
6.42	91.7	1.9	1.93	1.0	97.1
13.30	84.4	2.3	4.82	1.9	93.3
25.50	71.1	3.4	11.40	3.9	84.7
36.70	58.9	4.4	21.60	6.9	71.5
44.30	45.1	10.6	31.10	10.8	58.1
46.40	37.1	16.5	36.20	15.1	48.7

Source: *Trans. A.I.Ch.E.*, 36, 601, 628 (1940). With permission.

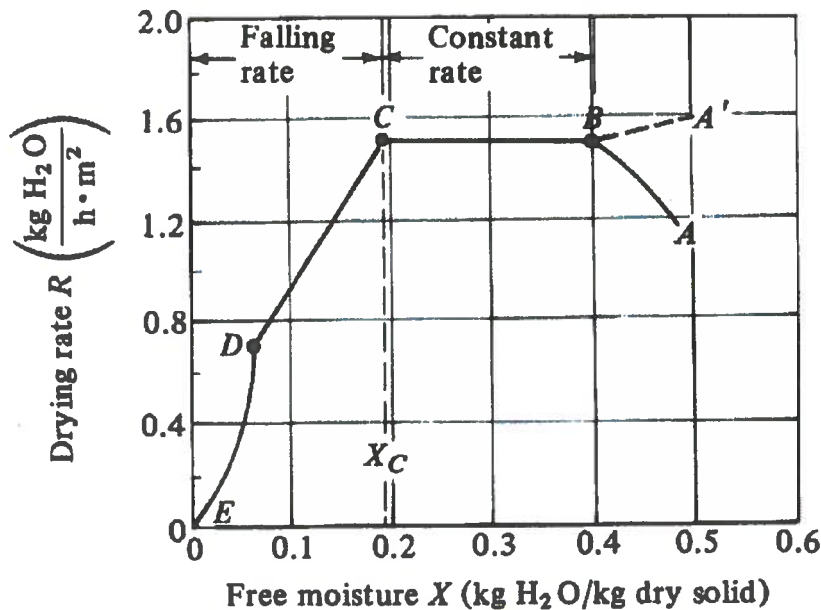


## Oppgave 2 /Oppgåve 2 Tørking (30%)

- Forklar med skisse hva vi mener når vi sier 1) at tørkeprosessen skjer adiabatisk, og 2) hva vi forstår med våtkuletemperatur
- Du har gitt en typisk tørkekurve i figuren under hvor tørkeraten ( $R$ ) er en funksjon av fritt vann ( $X$ ).  
Forklar hvordan tørkingen skjer i de tre forskjellige områdene; B-C, C-D, D-E
- Den generelle tørkeligningen er gitt under. Utled likningen for tiden ved konstant tørkerate, og for fallende tørkerate.
- Luft av temperatur  $65^{\circ}\text{C}$  (tørrkuletemperatur) har et duggpunkt på  $30^{\circ}\text{C}$ . Vi vil benytte denne lufta for å tørke granulatet (hundefor). Hvor mye fuktighet ( $H$ ) inneholder denne lufta ved start? Hvor mange prosent fuktighet?
- Vi tørker adiabatisk til 90% fuktighet ved utløp – hva er nå temperaturen på lufta?  
*Vis i vedlagte diagram hvordan du finner svarene for d) og e) – dette arket skal vedlegges besvarelsen*
- Vi benytter en brett-tørker med areal  $2\text{ m}^2$ , og ønsker å produsere  $10\text{ kg}$  av granulatet (hundeforet) som ved start inneholder  $0,4\text{ kg H}_2\text{O/kg}$  tørt materiale. Vi vil benytte det gitte diagrammet under, men antar at linjen C-E er rett og går gjennom origo. Bestem tiden det tar å tørke til  $0,05\text{ kg H}_2\text{O/kg}$  tørt materiale som er granulatets fuktighetsinnhold ved likevekt ( $X^*$ ). Det kritiske vanninnhold ( $X_c$ ) er  $0,18\text{ kg H}_2\text{O/kg}$  tørt materiale.

Gitt: 
$$R = -\frac{L_s dX}{A dt}$$

Hvor  $L_s = \text{kg tørt stoff}$ ,  $A = \text{tørkeflate (m}^2\text{)}$ ,  $t = \text{tørketid (h)}$



### Oppgave 3/ Oppgave 3 Gass-separasjon med membraner (20%)

- a) Skisser en membran med inn- og utstrømmer for fullstendig blandingsmodell, og sett på symboler for hva som måles de forskjellige steder. Benytt de samme symbolene som er gitt i likningen under
- b) Oksygenanriket luft benyttes i forskjellige anvendelser. To eksempler er i en pustemaskin på et sykehus, et annet er for mer effektiv forbrenning.  
En hulfibermembran med en selektiv tykkelse på  $1\ \mu\text{m}$  produserer oksygenanriket luft. Permeabiliteten for  $\text{O}_2$  ( $P_{\text{O}_2}$ ) er  $1,109 \cdot 10^{-6}$  [ $\text{m}^3(\text{STP})\text{m} / (\text{m}^2 \text{bar h})$ ], og selektiviteten for  $\text{O}_2/\text{N}_2$  er  $\alpha = 5$ . Fødesiden har et trykk på 2 bar; permeatsiden holdes på 0,2 bar. Det skal produseres  $2\ \text{m}^3(\text{STP})/\text{time}$  av 45vol%  $\text{O}_2$ . Permeatkuttet ( $\theta = q_p / q_f$ ) er 0,10  
Beregn sammensetningen av retentatstrøm, luftmengden inn til membranen og nødvendig membranareal.  
  
Benytt "complete mixing model" (likning gitt under oppgaven) – presiser eventuelle antagelser.
- c) Dersom du isteden skulle produsere  $\text{N}_2$  med høy renhet (95 vol%), hvordan ville du da velge å arrangere membranseparasjonen din? (Kommenter på fødestrykk, trykkforhold, permeatkutt og beregningsprosedyre.) Beregning er ikke nødvendig.

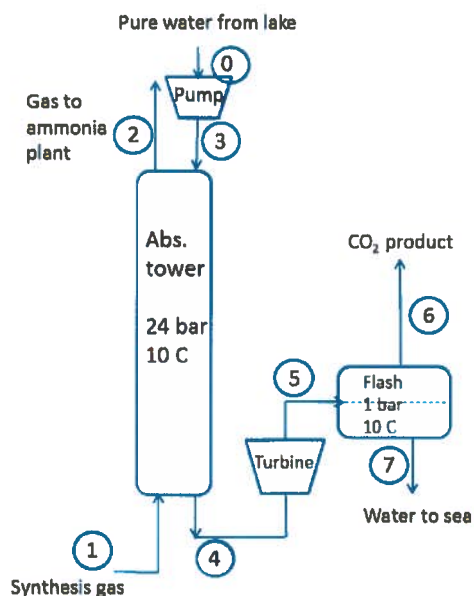
Gitt: Likning gasseparasjon:

$$\frac{q_A}{A_m} = \frac{q_p \cdot y_p}{A_m} = \left( \frac{P_A}{l} \right) (p_h x_0 - p_l y_p)$$

hvor  $q_A$  = permeatfluksen av komponent A ( $\text{m}^3(\text{STP})/\text{h}$ ),  $P_A$  er permeabilitet (dimensjoner gitt i tekst),  $l$  = membrantykkelsen (m),  $A_m$  = permeasjonsareal ( $\text{m}^2$ ),  $p$  = trykk (bar),  $x_0$  og  $y_p$  molfraksjoner av komponent A

## Oppgave 4/Oppgave 4 (Absorpsjon og likevekt, 25%)

Vi ser på CO<sub>2</sub>-absorpsjon i forbindelse med ammoniakkproduksjon (dette er vannvasken til Yara som ble nevnt i forelesningen). Fødegassen fra syntesegassanlegget er på 6646 kmol/h og består av N<sub>2</sub> (ca. 20 mol-%), H<sub>2</sub> (ca. 60 mol-%), andre inerte gasser og 17 mol-% CO<sub>2</sub> (strøm 1), og vi ønsker å redusere CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i gassen som går til ammoniakkanlegget til 0.3 mol-% (strøm 2). Vannføden til absorpsjonskolonnen inneholder ingen CO<sub>2</sub> (strøm 3).



- Henry's lov er gitt under, men den kan alternativt skrives på formen  $y=mx$  der  $x$  er molfraksjonen av CO<sub>2</sub> i vann. Finn  $m$  ved 0C, 10C og 20 C når  $p=24$  bar og når  $p=1$  bar (du kan lage en tabell).
- Hva er definisjonen av absorpsjonsfaktoren  $A$ ? Hvilke antagelser ligger bak bruk av Kremser's ligning? Gjelder disse antagelsene i vårt tilfelle? Vis at  $A$  kan skrives som funksjon av  $y_{N+1}$ ,  $y_1$ ,  $y^*_N$  og  $y^*_0$  (se formel og figur).
- Bestem minimum mengde vannmengde ( $L_{min}$ , strøm 3) i kmol/h og m<sup>3</sup>/h (med uendelig antall likevektstrinn).
- Det skal brukes 10% mer enn minimum vannmengde ( $L=1.1 L_{min}$ , strøm 3). Hva er CO<sub>2</sub>-fraksjonen i vannet ut ( $x_N$ , strøm 4)? Hvor mange likevektstrinn ( $N$ ) trenges? Du kan beregne  $N$  med Kremser-ligningen, men vis også løsningen i  $xy$ -diagram (McCabe-Thiele).  
Kommentar: Hvis du ikke fikk til delspørsmål © så bruk  $L=5000$  m<sup>3</sup>/h (strøm 3).
- Hva blir sammensetningen av gassen ut (strøm 2) dersom  $N=50$ . Bruk her samme verdier for  $L$  (strøm 3) og  $x_N$  (strøm 4) som i delspørsmål (d).
- Uavhengig spørsmål: Hva er CO<sub>2</sub>-fraksjonene ( $y,x$ ) i strømmene ut fra flashtanken (strøm 6 og 7)? Hvor stor del (i prosent) av den opprinnelige CO<sub>2</sub>-en tas ut i CO<sub>2</sub>-produktet (strøm 6)-

Data er gitt under og på figur. Angi ytterligere antagelser du gjør for å løse oppgaven.

Some data (you do not need all of this):

Henry's law for CO<sub>2</sub> in water: Partial pressure is  $p_{CO_2} = H x_{CO_2}$  where  $H=719$  bar at 0C,  $H=1027$  bar at 10C,  $H=1402$  bar at 20C,  $H=1835$  bar at 30C, and  $H=2300$  bar at 40C.

Vapor pressure for water:  $p^{sat}=0.012$  bar at 10C and  $p^{sat}=1$  bar at 100C.

Heat of vaporization for water at 100C: 40.7 KJ/mol

Heat capacity for water: 4.18 KJ/kg,K (liquid) and 1.87 KJ/kg,K (gas).

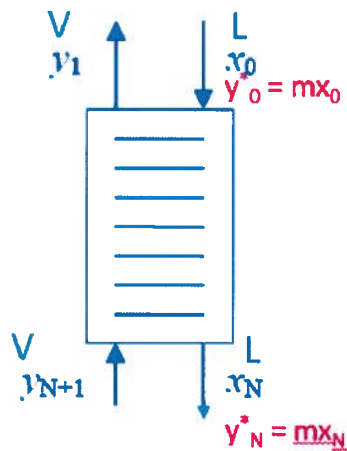
Heat capacity for CO<sub>2</sub>: 37 J/K,mol (gas)

Molecular weights [g/mol]: 44 for CO<sub>2</sub> and 18 for water

Density water: 1000 kg/m<sup>3</sup>

R = 8.31 J/K,mol

Kremser equations:



Book eq. (10.3-25):

$$\frac{y_{N+1} - y_1}{y_{N+1} - y_0^*} = \frac{A^{N+1} - A}{A^{N+1} - 1}$$

Alternative simpler form (Sigurd):

$$\frac{y_{N+1} - y_N^*}{y_1 - y_0^*} = A^N$$

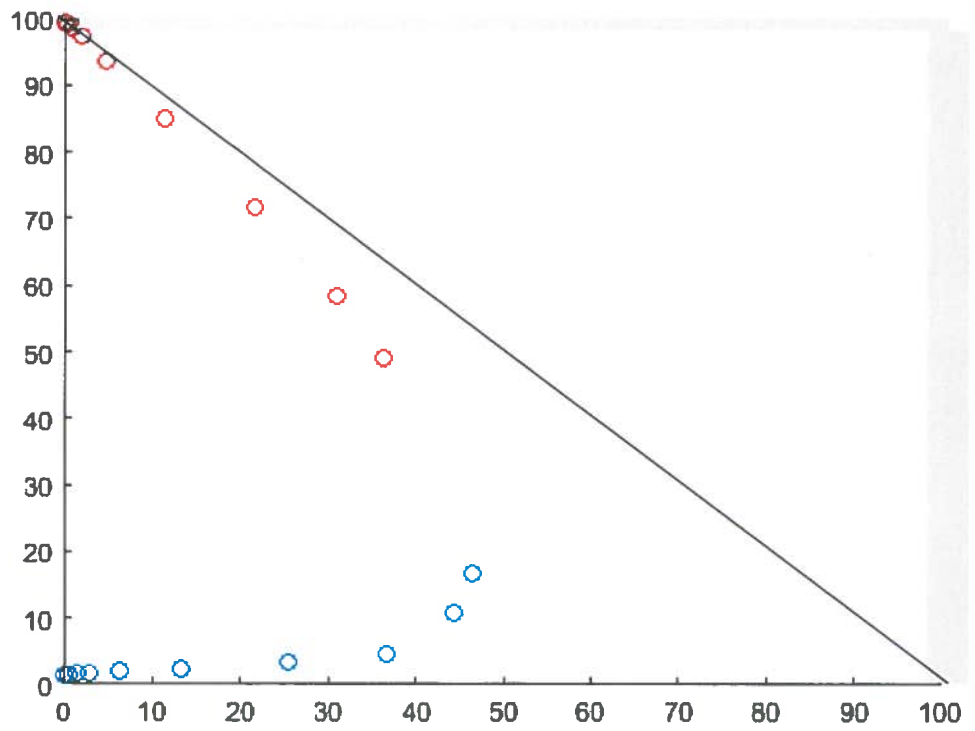
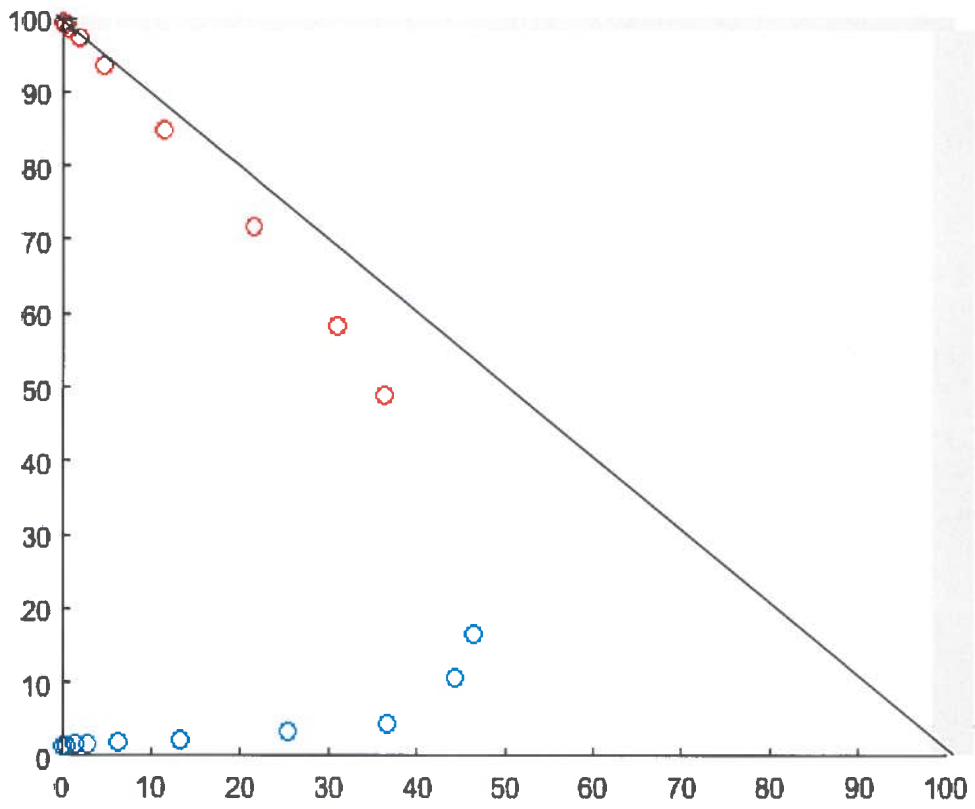
Get:

$$N = \ln \frac{y_{N+1} - y_N^*}{y_1 - y_0^*} / \ln A$$

Note. Can write:

$$A = \frac{y_{N+1} - y_1}{y_N^* - y_0^*}$$

- = in equilibrium with other phase  
(could be imaginary composition, like  $y_0^*$ )



# Humidity Chart

# APPENDIX 2

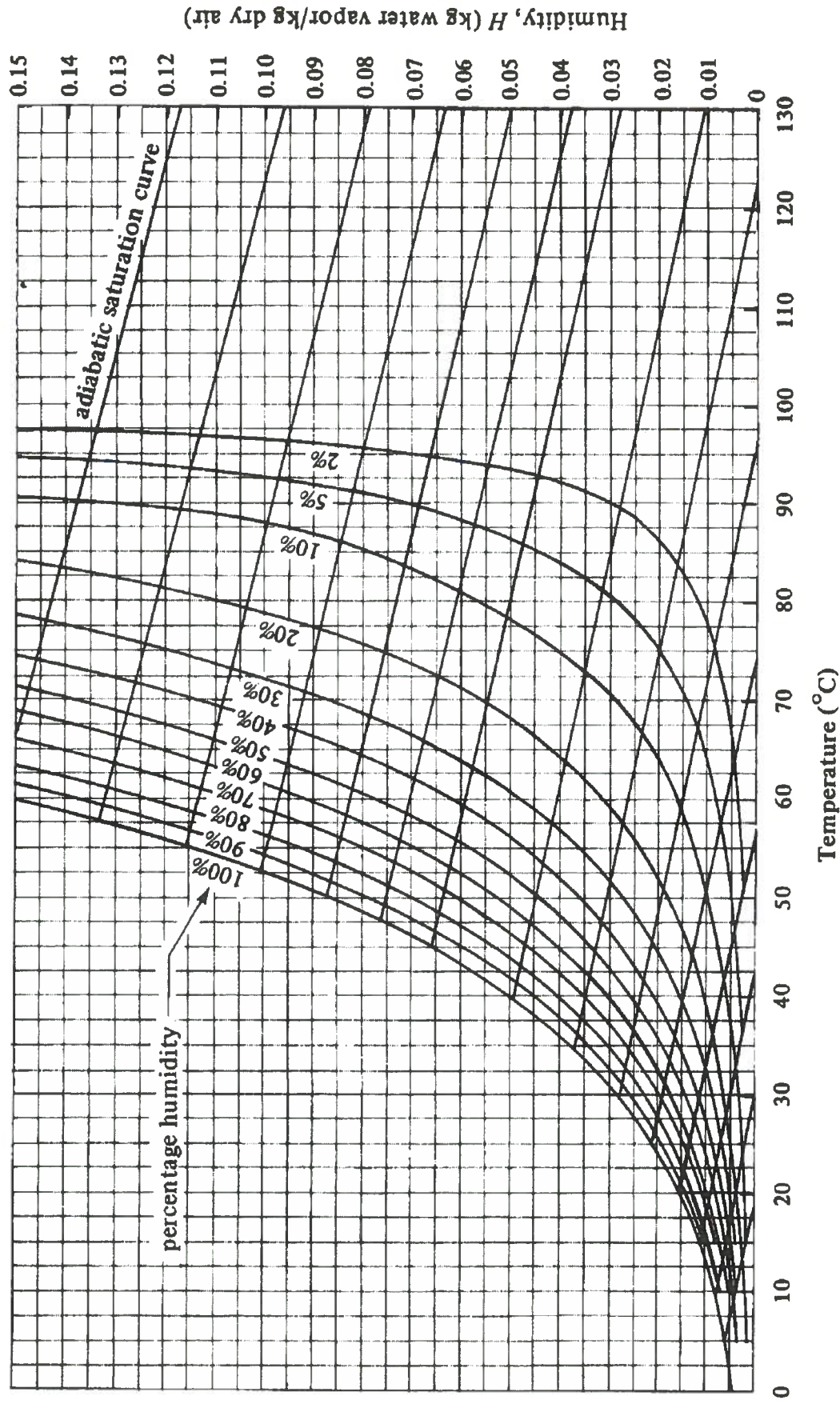


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, *Mass-Transfer Operations*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)