

## **IPT toets 2 - 29-05-2015, 8:45-10:30**

Cursus: 4051IPTECY Inleiding ProcesTechnologie  
Docenten: F. Kapteijn & V. van Steijn

---

- Lees elke vraag goed door voordat je begint
  - Schrijf op elk blad je naam en studentnummer en nummer alle bladen
  - Gebruik een pen, geen potlood
  - Schrijf op welke berekeningen je uitvoert, de weg naar het antwoord is minstens zo belangrijk als het antwoord zelf
  - Geef bij getallen ook de bijbehorende eenheden
  - Je kunt in totaal **44** punten halen. De punten zijn per vraag en per deelvraag aangegeven, verdeel je tijd goed
  - Het is alleen toegestaan om een gewone rekenmachine en een handgeschreven A4-tje te gebruiken, andere zaken zoals boek en grafische rekenmachine zijn niet toegestaan
  - Smartphones dienen uitgezet te zijn
- 

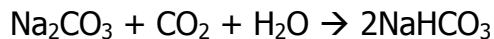
### **Vraag 1 (3 pt) Definities**

Leg uit wat de volgende algemene begrippen betekenen:

- (a) "Hypothetisch pad" (in thermodynamische zin) (**1pt**)
- (b) "Intensieve variabele" (**1 pt**)
- (c) "Relatieve vochtigheid" (geef formule) (**1 pt**)

### **Vraag 2 (41 pt) Synthese van natriumbicarbonaat**

Natriumbicarbonaat (ook wel bekend als bakpoeder of "baking soda") is een belangrijk product en wordt gemaakt in een continu proces door natriumcarbonaat te laten reageren met kooldioxide en water volgens



Dit gebeurt in een reactor bij 70°C en een druk van 3 atm. De reactor wordt gevoed met twee stromen: stroom ① is een waterige oplossing die 1.3 mol% natriumcarbonaat bevat en de reactor instroomt met een moldebiet van 10<sup>4</sup> mol/uur, terwijl stroom ② een gasstroom is die voor 70 mol% uit CO<sub>2</sub> bestaat en de rest (droge) lucht. In de reactor reageert al het natriumcarbonaat.

**-- vervolg op volgende pagina --**

Twee stromen verlaten de reactor: de gasstroom (stroom ③) die de reactor uitgaat bij dezelfde condities als in de reactor heersen. Deze stroom bevat de lucht en niet-gereageerd  $\text{CO}_2$  en is verzadigd met waterdamp; de andere stroom (stroom ④) die de reactor verlaat is een "slurry" en bestaat uit niet-opgelost natriumbicarbonaat kristallen en een waterige oplossing verzadigd met natriumbicarbonaat in een molpercentage van 3.6%. De molverhouding vaste kristallen / verzadigde oplossing is 0.25. Deze stroom bevat geen opgeloste lucht of  $\text{CO}_2$ .

Stroom ④ wordt naar een filter-unit gepompt, waar het grootste deel van de vloeistof van de vaste stof wordt gescheiden. De ingaande stroom heeft dezelfde condities als de reactor, terwijl het filter en uitgaande stromen een temperatuur en druk hebben van  $80^\circ\text{C}$  en 3 atm. Om dit te bereiken wordt een onbekend warmtedebiet  $\dot{Q}$  aan de filter-unit toegevoerd. Uitgaande stroom ⑤ bevat 60 mol% natriumbicarbonaat kristallen en de rest verzadigde oplossing, terwijl uitgaande stroom ⑥ pure verzadigde oplossing is.

- (a) Teken en label een stromingsdiagram van dit proces en verwerk daarin alle relevante informatie die gegeven is in de beschrijving van het proces. (8 pt)

**Belangrijk:** In opgave (b) ga je een vrijheidsgradenanalyse uitvoeren; hierbij is het belangrijk op te merken dat het hier om een reagerend system gaat; omdat je nog niet geleerd hebt hoe je een energiebalans opstelt voor een reagerend system moet je de energiebalans buiten beschouwing laten voor de reagerende delen van dit proces.

- (b) Voer een complete vrijheidsgradenanalyse uit voor het hele proces én over de subonderdelen; benoem daarbij expliciet welke parameters onbekend zijn en welke relaties gebruikt kunnen worden bij het oplossen. Leg op basis van deze analyse uit welke subsystemen achtereenvolgens te analyseren om alle onbekenden op te lossen. (7 pt)

### **Beschouw de reactor**

- (c) Geef de algemene vorm van de "Gibbs phase rule" en beargumenteer dat de molfractie water in stroom ③ thermodynamisch vastligt. Neem  $\text{CO}_2$ -lucht als één component. (3 pt)
- (d) Bereken de molfractie water in stroom ③ (3 pt)
- (e) Geef alle materiaalbalansen. Beargumenteer hoeveel van deze balansen onafhankelijk zijn. (5 pt)

**-- vervolg op volgende pagina ---**

Het oplossen van alle onbekenden voor de reactor kost te veel tijd op de toets. Daarom geven we hier een deel van de oplossing:

$$\dot{n}_2 = 74223 \text{ mol/uur}, \dot{n}_3 = 82957 \text{ mol/uur}, \dot{n}_4 = 1136 \text{ mol/uur},$$

fractie water in stroom ③ = 10.7 mol%, fractie lucht in stroom ③ = 26.8 mol%.

Let op: Een deel van deze gegevens heb je nodig in de rest van de opgave.

### **Beschouw nu de filter-unit**

- (f) Gebruik het oplosbaarheidsdiagram om te bepalen wat de molfractie van opgelost natriumbicarbonaat is in beide uitgaande stromen. **(2 pt)**
- (g) Geef alle onafhankelijke materiaalbalansen; bepaal nu de hoeveelheid vaste kristallen die de filter-unit per uur verlaten en laat zien dat deze iets minder is dan de hoeveelheid vaste kristallen die de unit ingaat. **(4 pt)**
- (h) Geef de algemene vorm van de energiebalans. Leg daarna uit welke termen weggelaten/verwaarloosd kunnen worden en geef de versimpelde algemene energiebalans. **(2 pt)**
- (i) Druk de energiebalans uit in de variabelen (zoals molaire debieten en specifieke enthalpieën) voor dit subsysteem. **(2 pt)**

Mocht het niet gelukt zijn om (g) op te lossen, gebruik dan de volgende waarden bij het oplossen van onderdeel (j):  $\dot{n}_5 = 350 \text{ mol/uur}$ ,  $\dot{n}_6 = 786 \text{ mol/uur}$ .

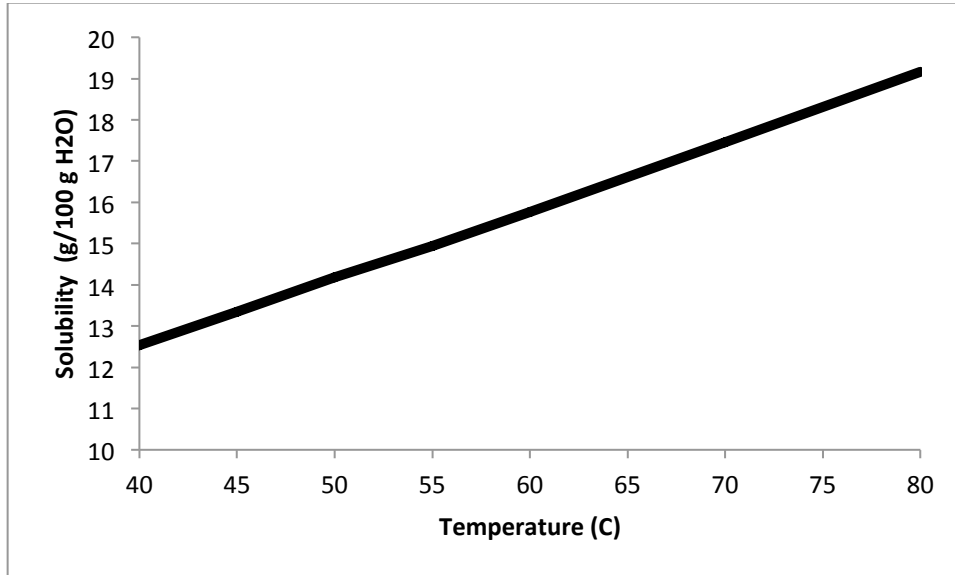
- (j) Bereken de specifieke enthalpieën voor ingaande en uitgaande stromen. Gebruik hierbij de aanname dat de verzadigde oplossingen beschreven kunnen worden als water. Specificeer welke referentieconditie(s) je gebruikt hebt en leg uit waarom je voor deze referentie(s) gekozen hebt. Bereken vervolgens de warmtestroom  $\dot{Q}$ . **(4 pt)**
- (k) Leg uit hoe je de operatie van de filter-unit kunt aanpassen om de opbrengst vaste kristallen te verhogen. **(1 pt)**

**--- einde toets 2 ---**

**-- Benodigde gegevens en tabellen --**

Molmassa's: H=1 g/mol, O=16 g/mol, C=12 g/mol, Na=23 g/mol

**Solubility diagram natriumbicarbonaat**



**Table B.4** Antoine Equation Constants<sup>a</sup>

$$\log_{10} p^* = A - \frac{B}{T + C} \quad p^* \text{ in mm Hg, } T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

*Example:* The vapor pressure of acetaldehyde at 25°C is determined as follows:

$$\log_{10} p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 8.00552 - \frac{1600.017}{25 + 291.809} = 2.9551$$

$$\Rightarrow p_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}}^*(25^\circ\text{C}) = 10^{2.9551} = 902 \text{ mm Hg}$$

Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Water*	H <sub>2</sub> O	0 to 60	8.10765	1750.286	235.000
Water*	H <sub>2</sub> O	60 to 150	7.96681	1668.210	228.000

Conversie: 760 mm Hg = 1 atm

**C<sub>p</sub>-relaties:**

- NaHCO<sub>3</sub>(s):  $c_p(T) = 87.61 \text{ J/mol K}$
- H<sub>2</sub>O (l):  $c_p(T) = 75.4 \text{ J/mol K}$

# EINDANTWOORDEN IPT toets 2 - 29-05-2015, 8:45-10:30

Cursus: 4051IPTECY Inleiding ProcesTechnologie  
 Docenten: F. Kapteijn & V. van Steijn

## Opgave 1

(a) (1pt)

The fact that internal energy and enthalpy are state properties means that any convenient process path from a reference state to a process state may be chosen, even if the actual process proceeds by a different path. This chosen path we call the hypothetical path.

(b) (1 pt)

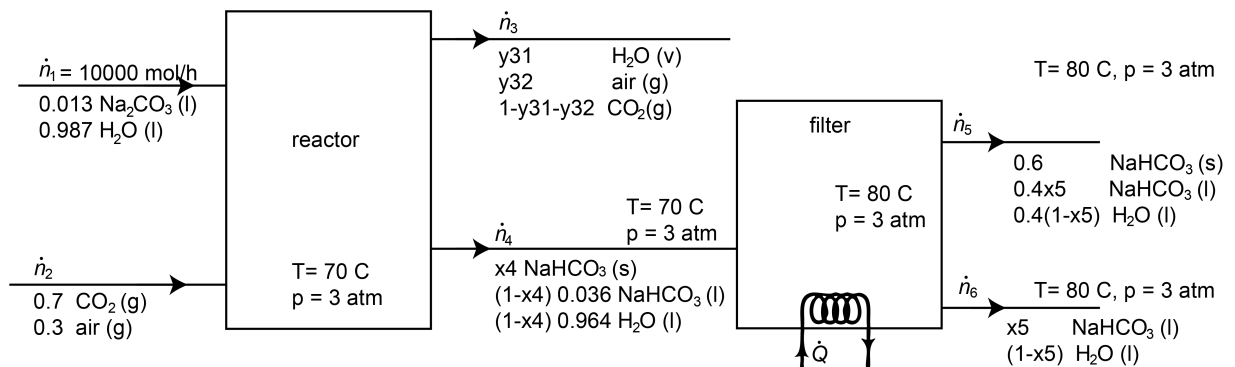
The variables that describe the condition of a process system fall into two categories: **extensive variables**, which depend on the size of the system, and **intensive variables**, which do not. Mass and volume are examples of extensive variables; intensive variables include temperature, pressure, density and specific volume, and mass and mole fractions of individual system components in each phase.

(c) (1 pt)

$$\text{Relative Saturation (Relative Humidity)} \quad s_r(h_r) = \frac{P_i}{P_i^*(T)} \times 100\% \quad (6.3-4)$$

## Opgave 2

(a) (8 pt)



(b) (7 pt)

**Hele proces (reagerend; op basis van atomen)****(2 pt)**7 onbekenden ( $n_2, n_3, n_5, n_6, y_{31}, y_{32}, x_5$ )

-1 onafhankelijke inerte molecuulbalansen ("air")

- **3** (!! ) onafhankelijke atoombalansen (Na, C, O, H)

- 2 extra gegeven

stroom 3 is verzadigd met waterdamp, dit geeft  $y_{31}$ vloeistofstromen 5 en 6 zijn verzadigd met bicarbonaat, dit geeft  $x_5$ 

---

DF = 1

Let op: voor hele proces en reactor kun je 4 atomic balances opstellen, maar deze zijn niet onafhankelijk:  $2*[1*O-2*C]-1*H=Na$ . Dit is zeker niet triviaal; wanneer dit niet gezien is en er 4 independent atomic balances opgeschreven worden in plaats van 3 niet foutrekenen.

**Reactor (reagerend; op basis van atomen)****(2 pt)**6 onbekenden ( $n_2, n_3, n_4, y_{31}, y_{32}, x_4$ )

-1 onafhankelijke inerte molecuulbalansen ("air")

-**3** onafhankelijke atoombalansen (Na, C, O, H)

-2 extra gegeven

stroom 3 is verzadigd met stoom, dit geeft  $y_{31}$ molverhouding  $x_4 n_4 / (1-x_4) n_4 =$  gespecificeerd

---

DF = 0**Filter-unit (niet-reagerend; op basis van moleculen)****(2 pt)**6 onbekenden ( $n_4, n_5, n_6, x_4, x_5, Q$ )-2 onafhankelijke componentbalansen ( $NaHCO_3, H_2O$ )

- 1 energiebalans over de filter-unit

- 1 extra gegeven

vloeistofstromen 5 en 6 zijn verzadigd met bicarbonaat, dit geeft  $x_5$ 

---

DF = 2**Volgorde****(1 pt)**Eerst de reactor, want dan  $DF=0$ ; dit geeft  $n_2, n_3, n_4, y_{31}, y_{32}, x_4$ .Daarna bijvoorbeeld de filter-unit, want na oplossen van reactor zijn  $x_4$  en  $n_6$  bekend, dus de twee oorspronkelijke vrijheidsgraden zijn nu bekend. Dan is alles bekend(c) **(3 pt)**

$$DF = 2 + C - P$$

Let op: het evenwicht stelt zich in in de reactor. In de reactor hebben we damp, vloeistof en vaste stof. Dus, drie fasen:  $P=3$ .

We beschouwen "air en CO<sub>2</sub>" als één component, dus samen met H<sub>2</sub>O en natriumbicarbonaat hebben we drie componenten: C=3;

$$DF = 2 + 3 - 3 = 2$$

Omdat druk en temperatuur zijn gespecificeerd, liggen alle andere intensieve variabelen, zoals de molfractie H<sub>2</sub>O in de dampfase vast.

(d) **(3 pt)**

Eerst rekenen van de dampdruk met Antoine en tabel B4

$$p^*(T=70C) = 233.7 \text{ mm Hg} = 233.7 / 760 = 0.308 \text{ atm}$$

Nu uitrekenen molfractie via Raoult

$$y_{H_2O} P = x_{H_2O} p^*(T=70C)$$

(Indien gebruikt  $x_{H_2O}=1$ , niet fout rekenen.)

$$y_{H_2O} = 0.308 \text{ atm} * 0.964 / 3 \text{ atm} = 0.10 \text{ [mol H}_2\text{O per mol stroom 3]}$$

(e) **(5 pt)** [+ 1 bonus punt in geval onafhankelijkheid gezien is]

$$\text{Molecuulbalans "air": } 0.3 n_2 = y_{32} n_3$$

$$\text{Atoombalans Na: } 2 * 0.013 n_1 = 1 * x_4 n_4 + 1 * (1 - x_4) 0.036 n_4$$

$$\text{Atoombalans C: } 1 * 0.013 n_1 + 0.7 n_2 = 1 * (1 - y_{31} - y_{32}) n_3 + 1 * x_4 n_4 + 1 * (1 - x_4) 0.036 n_4$$

$$\text{Atoombalans H: } 2 * 0.987 n_1 = 2 * y_{31} n_3 + 1 * x_4 n_4 + 1 * (1 - x_4) 0.036 n_4 + 2 * (1 - x_4) 0.964 n_4$$

$$\text{Atoombalans O: } 3 * 0.013 n_1 + 1 * 0.987 n_1 + 2 * 0.7 n_2 = 1 * y_{31} n_3 + 2 * (1 - y_{31} - y_{32}) n_3 + 3 * x_4 n_4 + 3 * (1 - x_4) 0.036 n_4 + 1 * (1 - x_4) 0.964 n_4$$

Onafhankelijk? **[BONUS PUNT + 1]**

Let op: ook hier geldt dat deze vier atoombalansen niet onafhankelijk zijn:  $2 * [1 * O - 2 * C] - 1 * H = Na$ . Er zijn dus 4 onafhankelijke materiaalbalansen (en niet 5).

(f) **(2 pt)**

Aflezen solubility bij 80°C: 19.2 g/100 g water

Bepaling molfractie

$$19.2 \text{ g NaHCO}_3 / 83 \text{ g/mol} = 0.23 \text{ mol}$$

100 g H<sub>2</sub>O / 18 g/mol = 5.56 mol

Molfractie NaHCO<sub>3</sub> in verzadigde oplossing:  $x_5 = 0.23 / (0.23 + 5.56) = 0.04$

(g) (4 pt)

Twee onafhankelijke componenten:

$$\text{NaHCO}_3: \quad x_4 n_4 + (1-x_4)0.036n_4 = 0.6n_5 + 0.4x_5 n_5 + x_5 n_6$$

$$\text{H}_2\text{O}: \quad (1-x_4)0.964n_4 = 0.4(1-x_5)n_5 + (1-x_5)n_6$$

Let op, je mag NaHCO<sub>3</sub> (s) en NaHCO<sub>3</sub> (l) niet als twee verschillende componenten beschouwen!

Nu hebben we twee vergelijkingen met twee onbekenden ( $n_5$  en  $n_6$ ). Oplossen geeft

**$n_5 = 372.5$  mol/uur,  $n_6 = 763.9$  mol/uur**

De productie van kristallen =  $0.6n_5 = 223.5$  mol/uur

(h) (2 pt)

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}k + \Delta\dot{E}p$$

Geen werk en verwaarloosbare kinetische en potentiële energie.

$$\dot{Q} = \Delta\dot{H}$$

(i) (2 pt)

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{H}_{out} - \dot{H}_{in} \\ &= 0.6n_5 \hat{H}_{\text{NaHCO}_3(s), uit} + 0.4n_5 \hat{H}_{\text{H}_2\text{O}(l), uit} + n_6 \hat{H}_{\text{H}_2\text{O}(l), uit} - x_4 n_4 \hat{H}_{\text{NaHCO}_3(s), in} - (1-x_4)n_4 \hat{H}_{\text{H}_2\text{O}(l), in} \end{aligned}$$

(j) (4 pt)

Referenties: NaHCO<sub>3</sub> (s):  $T=70$  C,  $p = 3$  atm

H<sub>2</sub>O (l):  $T=70$  C,  $p = 3$  atm

Uitleg referenties:

Het is het handigst om ofwel de ingang ofwel de uitgangskondities te gebruiken als referentie; we maken immers geen gebruik van getabelleerde waarde met een reeds gespecificeerde referentie.

Bepalen specifieke enthalpieën:

$$\hat{H}_{\text{NaHCO}_3} = \int_{70}^{80} C_{p, \text{NaHCO}_3} dT = \int_{70}^{80} 87.61 dT = (80-70) * 87.61 \text{ J/mol K} = 0.8761 \text{ kJ/mol}$$



$$\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}} = \int_{70}^{80} C_{p,\text{H}_2\text{O}} dT = \int_{70}^{80} 75.4 dT = (80-70) * 75.4 \text{ J/mol K} = 0.754 \text{ kJ/mol}$$

Uitwerken energiebalans:

$$\dot{Q} = 0.6n_5\hat{H}_{\text{NaHCO}_3(\text{s}),\text{uit}} + 0.4n_5\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}(\text{l}),\text{uit}} + n_6\hat{H}_{\text{H}_2\text{O}(\text{l}),\text{uit}}$$

$$\dot{Q} = 0.6*372.5*0.8761 + 0.4*372.5*0.754 + 763.9*0.754 = 884 \text{ kJ/uur}$$

(k) (1 pt)

Temperatuur verlagen in plaats van verhogen, dan kan er namelijk minder natriumbicarbonaat oplossen in de vloeistof.