***Exercice1* :** (humidification)

On désire obtenir de l’air humide (2) ayant une température de 30 °C et une humidité relative de 40 % à partir de l’air humide (1) se trouvant à une température de 25 °C et une température de bulbe humide de 13,5 °C.

1. Proposer les opérations nécessaires pour réaliser cette humidification.
2. Indiquer sur le diagramme d’humidité ces opérations.
3. Calculer la chaleur nécessaire si le débit massique de l’air sec traité est de 3 kg/s

***Exercice2* :** (humidification)

Pour humidifier et refroidir une masse $m\_{1}=40 kg$ d’air humide (1) se trouvant à une température sèche de 50 °C et une humidité relative de 10 %, on le mélange avec une masse $m\_{2}=35 kg$ d’air humide (2) saturé se trouvant à une température sèche de 24 °C. On suppose que le mélange se fait de manière adiabatique (pas de pertes thermiques vers le milieu externe).

1. A partir du diagramme d’humidité, déterminer les humidités absolues des airs (1) et (2)
2. Calculer les masses d’air sec contenues dans les airs (1) et (2) (notés $m\_{s1} $et $m\_{s2}$)
3. Calculer l’humidité absolue de l’air (3) résultant du mélange des deux airs (1) et (2).
4. Représenter sur le diagramme d’humidité les points relatifs aux airs (1), (2) et (3)
5. Déterminer à partir du diagramme : la température, le point de rosée, l’humidité absolue et l’enthalpie massique de l’air (3).
6. Pour la même masse d’air humide (1), calculer la masse $m\_{2}$ d’air humide saturé (2) pour que le mélange final ait une humidité absolue égale à 15,4 g/kg d’air sec.

***Exercice 3* :** (séchage)

Un séchoir à convection fonctionnant à contre courant fournit 400kg.h-1 d'un produit dont l'humidité rapportée au solide sec est de 5.3%. L'humidité de la matière à sécher, toujours rapportée au solide sec est de 118%.
Le gaz sortant du séchoir contient 120g d'eau par kg d'air sec. Une fraction de ce gaz est recyclée et additionnée à de l'air frais contenant 10g d'eau par kg d'air sec. Le mélange qui pénètre dans le séchoir, après avoir été réchauffé, renferme 45g d'eau par kg d'air sec.

11°) Calculer le débit d'alimentation en produit humide M×(1+Xe).

2°) Calculer le débit d'eau évaporée par heure au cours du séchage M×(Xe-Xs).

3°) Calculer le débit de gaz (compté en gaz sec) circulant dans le séchoir V+R.

4°) Calculer le débit d'air frais V (compté en gaz sec) à mélanger avec le gaz recyclé R.

***Exercice 4* :** (séchage)

  De l'air ambiant déshumidifié entre à une température de 20°C et une humidité relative εE=5%. Son débit global est 1.08xe4 m3.h-1, son Cp 1.01 kJ.kg-1.K-1, et sa masse volumique 1.2 kg.m-3. La puissance du préchauffeur est 295 kW.

1°) Déterminer l'humidité absolue de l'air à l'entrée YE et à la sortie Y'E du préchauffeur.
2°) Calculer le débit massique d'air humide.
3°) Calculer la température de l'air en sortie du préchauffeur. En déduire son humidité relative ε'E et son enthalpie H'E.

 L’air chaud alimente un sécheur rotatif à tambour à contre-courant. Le débit de solide humide entrant dans le sécheur est 35000 kg.h-1, et son titre massique en eau est xE = 1%. On admet que le séchage s'effectue dans des conditions isenthalpiques pour l'air, et que son humidité relative en sortie est εS=85%.

4°) Connaissant εS, déterminer la température et l'humidité absolue YS de l'air en sortie du sécheur.
5°) Calculer l'humidité du solide entrant XE, et le débit de solide sec M.
6°) Déterminer, pour le solide en sortie, le titre massique en eau xS et le taux d'humidité XS .

Données: Tableaux des propriétés de l'air extraites du diagramme de l'air humide.

* Y humidité absolue en g d'eau/kg d'air sec
* H enthalpie de l'air en kJ/kg d'air sec
* Humidité relative en %
* T température en °C

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|

|  |
| --- |
| Tableau 1 |
| ε | Y | T |
| 5 | 0.2 | 5 |
| 5 | 0.3 | 10 |
| 5 | 0.4 | 15 |
| 5 | 0.7 | 20 |
| 5 | 1 | 25 |
| 5 | 1.3 | 30 |
| 5 | 1.7 | 35 |
| 5 | 2.3 | 40 |
| 5 | 3 | 45 |
| 5 | 3.9 | 50 |
| 5 | 5 | 55 |

 |

|  |
| --- |
| Tableau 2 |
| Y | T | ε | H |
| 0.7 | 76 | 50 | 78 |
| 0.7 | 81 | 30 | 82 |
| 0.7 | 86 | 25 | 87 |
| 0.7 | 91 | 20 | 93 |
| 0.7 | 96 | 15 | 97 |
| 0.7 | 101 | 10 | 102 |
| 0.7 | 106 | <10 | 108 |
| 0.7 | 111 | <10 | 113 |
| 0.7 | 116 | <10 | 118 |
| 0.7 | 121 | <10 | 123 |
| 0.7 | 126 | <10 | 128 |

 |

|  |
| --- |
| Tableau 3 |
| ε | H | Y | T |
| 85 | 74 | 18.5 | 26.3 |
| 85 | 78 | 19.8 | 27.4 |
| 85 | 82 | 20.8 | 28.3 |
| 85 | 86 | 22 | 29.2 |
| 85 | 90 | 23.1 | 30 |
| 85 | 94 | 24.3 | 30.9 |
| 85 | 98 | 25.8 | 32 |
| 85 | 102 | 26.9 | 32.5 |
| 85 | 106 | 28.1 | 33.2 |
| 85 | 110 | 29.3 | 34 |
| 85 | 114 | 30.4 | 34.8 |

 |

***Solution 1 :***

1. Une des possibilité consiste au chauffage de l’air (1) de la température $T\_{1}=25 °C$ jusqu’à la température $T\_{1}^{'}=43,5 °C$, ensuite son humidification dans une chambre d’humidification adiabatique de l’humidité absolue correspondant au point A ($Y\_{1}=5 g/kg)$ jusqu’à l’humidité absolue correspondant au point 2 ($Y\_{2}=10,83 g/kg)$. On obtient ainsi de l’air à une température de 30 °C et une humidité relative de 40 %.

تسخين الهواء (1) من 25°م الي 45°م تقريبا ومن بعد يتم يتم ترطيب الهواء داخل chambre d’humidification adiabatique ليتم تغير الرطوبة من $Y\_{1}=5 g/kg) $الى $Y\_{2}=10,83 g/kg)$ وبالتالي تصبح درجة الرطوبة النسبية 40 % وتنخفض درجة الحرارة بفعل الرطوبة المنتقلة من الماء ل 30°م

1. Voir le diagramme d’humidité.
2. La chaleur nécessaire si le débit massique de l’air sec traité est de 10 kg/s est calculée comme suit :

$$Q=\dot{m}×\left(H\_{2}-H\_{1}\right)$$

A partir du diagramme, les enthalpies massiques de l’air (1) et (2) sont :

$$H\_{1}=38 kJ/kg d'air sec$$

$$H\_{2}=58 kJ/kg d'air sec$$

$$Q=3×\left(58-38\right)=60 kJ/s=60 kW$$

***Solution 2 :***

1. $Y\_{1}=7,73 g/kg d'air sec$

$$Y\_{2}=19 g/kg d'air sec$$

1. $Y=\frac{m\_{eau}}{m\_{air sec}}=\frac{m\_{tot}-m\_{air sec}}{m\_{air sec}}=\frac{m\_{tot}}{m\_{air sec}}-1$

$$m\_{air sec}=\frac{m\_{tot}}{1+Y}$$

$$m\_{air sec1}=\frac{m\_{tot1}}{1+Y\_{1}}=\frac{40}{1+0,00773}=39,69 kg d'air sec$$

$$m\_{air sec2}=\frac{m\_{tot2}}{1+Y\_{2}}=\frac{35}{1+0,019}=34,35 kgd'air sec$$

1. Le bilan de masse sur la vapeur d’eau permet d’écrire :

$$Y=\frac{\left(m\_{air sec1}×Y\_{1}\right)+\left(m\_{air sec2}×Y\_{2}\right)}{m\_{air sec1}+m\_{air sec2}}=\frac{\left(39,69×7,73\right)+\left(34,35×19\right)}{39,69+34,35}=12,95 g/kg d'air sec $$

1. Voir diagramme
2. $T\_{3}=37,5 °C$, $T\_{rosée}=17,8 °C$, $ε=32 \%$, $H=71 kJ/kg d'air sec$
3. A partir du bilan de matière sur la vapeur d’eau :

$$\left(m\_{air sec1}+m\_{air sec2}\right).Y=\left(m \_{air sec1}×Y\_{1}\right)+\left(m\_{air sec2}×Y\_{2}\right)$$

$$m\_{air sec2}.\left(Y-Y\_{2}\right)=m\_{air sec1}\left(Y\_{1}-Y\right)$$

$m\_{air sec2}.=m\_{air sec1}\frac{\left(Y-Y\_{1}\right)}{\left(Y\_{2}-Y\right)}=39,69\frac{\left(15,4-7,73\right)}{\left(19-15,4\right)}=84,56 kg d'air sec $

La masse totale de l’air (2) nécessaire est :

$$m\_{tot2}=m\_{air sec2}\left(1+Y\_{2}\right)=84,56\*\left(1+0,019\right)=86,16 kg d^{'}air humide$$

**Solution 3 :**

1°) Le débit de solide humide en sortie est donné soit M×(1+Xs)=400 kg.h-1, et Xs=5.3%. On en tire M=400/(1+Xs)=400/1.053=379.9 kg.h-1. Le débit d'alimentation en solide humide est donc M×(1+Xe)=379.9×(1+1.18)=828.1 kg.h-1.
2°) Le débit d'eau évaporée vaut M×(Xe-Xs)=379.9×(1.18-0.053)=428.1 kg.h-1.
3°) L'eau évaporée est captée par le débit V+R de gaz dans le séchoir, entrant à 45 g.kg-1 d'air sec et sortant à 120 g.kg-1 d'air sec. On en déduit (V+R)(0.120-0.045)=428.1 kg.h-1, d'ou V+R=428.1/(0.120-0.045)=5708.1 kg.h-1.
4°) Cette eau évaporée est également captée par l'air frais V entrant et sortant de l'ensemble du séchoir+boucle de recyclage, d'ou V×(0.120-0.010)=428.1 kg.h-1, soit V=428.1/(0.120-0.010)=3891.9 kg.h-1.

***Solution 4 :***

1°) De l'air à 20°C et à 5% d'humidité relative contient Y=0.7 g.kg-1 d'air sec (cf tableau 1, 5ème ligne). Lors de son chauffage dans le préchauffeur, sa composition ou humidité absolue ne change pas, donc **Y'E=YE=0.7 g.kg-1** d'air sec.

2°) Le débit volumique d'air est 1.08.104 m3.h-1, sa masse volumique est 1.2 kg.m-3, son débit massique est donc **Fair**=1.08.104×1.2**=12960 kg.h-1**.

3°) La puissance du préchauffeur est 295 kW=295 kJ.s-1, soit 295×3600=1.062.106 kJ.h-1. Ce flux de chaleur s'écrit aussi Fair×Cp×(T'E-TE), soit **T'E=**TE+1.062.106/(Fair×Cp)=20+1.062.106/(12960×1.01)**=101.1°C**. On en déduit (tableau 2, ligne 6) **ε'E=10%** et **H'E=102 kJ.kg-1**.

4°) Le sécheur est isenthalpe, on a donc l'enthalpie en sortie de sécheur Hs=102 kJ.kg-1. Son humidité relative étant εS=85%, on en déduit (tableau 3, ligne 8) **Ys=26.9 g.kg-1** d'air et **Ts=32.5°C**.

5°) Le taux d'humidité du solide entrant est **XE=**xE/(1-xE)=0.01/0.99=**0.0101**. Le débit de solide humide est M×(1+XE)=35000 kg.h-1, d'ou **M**=35000/1.0101**=34650 kg.h-1**.

6°) L'eau cédée par le solide est aussi l'eau captée par l'air, ce qui s'écrit M×(XE-XS)=V×(YS-YE), d'ou XE-XS=(V/M)×(YS-YE) et **XS=**XE-(V/M)×(YS-YE)=0.0101-(12960/34650)×(0.0269-0. 0007)=**3.10-4**.

En séchage, les débits M et V sont exprimés en matière sèche et gaz sec dans le but de simplifier les équations bilan.

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage/schppe_sechageeb.gif**Séchage à l'ébullition*** Agitation du solide pour favoriser l'échange thermique
* Mise sous vide pour favoriser l'ébullition / évaporation
* fonctionnement continu ou discontinu
 | **Notations et bilan matière** rapport massique en liquide à l'entrée: XEsolide (sec) entrant: Mliquide entrant avec le solide: M XEsolide+liquide entrant: M(1+XE)rapport massique en liquide dans le solide en sortie: XSsolide sec sortant: Mliquide sortant avec le solide: M XSsolide+liquide sortant: M(1+XS) Liquide vaporisé dans le sécheur: V =  M(XE - XS ) |

|  |
| --- |
| http://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage/schppe_sechage.gif**Séchage par entrainement à l'air chaud à contre-courant** * Préchauffeur d'air à la vapeur.
* Humidité absolue de l'air identique à l'entrée et à la sortie du préchauffeur (YE, en g d'eau/kg d'air sec)
* Enthalpie fournie au sécheur: V ( H'E - HE )
* Sécheur fonctionnant de façon isenthalpe: transfert du liquide de la phase solide vers la phase gaz avec évaporation (sans ébullition) du liquide imprégnant le solide.
* Conditions de sortie d'autant plus proches de l'équilibre que le contact entre les deux phases est long et intime (longueur du sécheur, agitation du solide)
* Les conditions de sortie dépendent des caractéristiques de l'air entrant (enthalpie et humidité absolue).
* Liquide éliminé de la phase solide et capté par la phase gaz lors du séchage: M(XE - XS ) = V(YS - YE )
* En négligeant la variation d'enthalpie de la phase solide, et le sécheur fonctionnant de façon isenthalpe on peut écrire que V H'E = V HS , équation qui permet de déterminer la composition de l'air en sortie en fonction de ses conditions d'entrée.
 |

|  |
| --- |
| http://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage/schppe_sechagerecyclage.gif**Séchage par entrainement à l'air chaud avec recyclage** * Le recyclage permet un débit ou une vitesse d'air plus importante au niveau du sécheur
* Ce débit peut être réglé indépendament du bilan enthalpique, ce qui est utile pour un sécheur à fluidisation
 |

