ÉTUDE DE CAS - PASTEURISATION CONTINUE D'UN JUS DE POMME

Débit : 2 000 kg/h - échangeur tubulaire à eau chaude - régénération thermique

Paramètre	Valeur retenue
Débit massique du jus	2 000 kg/h
Température d'entrée	20 °C
Température de pasteurisation	90 °C
Temps de maintien pédagogique	20 s
Température finale	25 °C
Régénération thermique	70 %
Fluide chauffant	Eau chaude : 110 -> 100 °C

1. Hypothèses thermophysiques et géométriques

Grandeur	Valeur
Masse volumique du jus, ρ	1 045 kg/m³
Chaleur massique, Cp	3 900 J/(kg.K)
Viscosité dynamique, μ	1,6 mPa.s
Conductivité thermique du jus, λ	0,58 W/(m.K)
Tubes côté jus	4 tubes en parallèle
Diamètre intérieur, Di	25 mm
Épaisseur de paroi inox	1,5 mm
Conductivité de la paroi	16 W/(m.K)
Rfi / Rfo	0,0002 / 0,0001 m².K/W
Vitesse eau chaude	1,5 m/s
Diamètre hydraulique côté chaud	30 mm

2. Débit volumique et bilan thermique

Le débit massique est converti en débit SI :

$$\dot{m} = 2\,000 / 3\,600 = 0{,}556 \text{ kg/s}$$

Le débit volumique vaut :

$$\dot{V} = \dot{m} / \rho = 0{,}556 / 1\,045 = 5{,}32 \times 10^{-4} \text{ m³/s} = 1{,}91 \text{ m³/h}$$

Sans récupération thermique, la puissance pour chauffer le jus de 20 à 90 °C est :

$$Q = \dot{m}\, Cp\, (90 - 20) = 151{,}7 \text{ kW}$$

Avec une régénération de 70 %, le jus est préchauffé à :

$$T_{pré} = 20 + 0{,}70\,(90 - 20) = 69\ °C$$

La puissance récupérée est de 106,2 kW et le chauffage principal ne doit plus fournir que 45,5 kW.

3. Convection côté jus - calcul de h_i

Avec 4 tubes de 25 mm en parallèle, la vitesse moyenne du jus est :

$$V = 0{,}271 \text{ m/s}$$

Reynolds :

$$Re = \rho\, V\, Di / \mu = 4\,421$$

Prandtl :

$$Pr = \mu\, Cp / \lambda = 10{,}76$$

Dans le modèle de l'extension, la corrélation de Gnielinski donne :

$$Nu \approx 41{,}18$$

d'où :

$$h_i = Nu\, \lambda / Di \approx 955 \text{ W/(m².K)}$$

4. Convection côté eau chaude - calcul de h_o

Les propriétés de l'eau sont évaluées à la température moyenne de 105 °C dans le modèle pédagogique. Pour une vitesse de 1,5 m/s et un diamètre hydraulique de 30 mm :

$$Re_{eau} \approx 331\,000$$

$$Nu_{eau} \approx 501$$

$$h_o \approx 11\,828 \text{ W/(m².K)}$$

Le coefficient côté eau chaude est donc très supérieur à celui du jus : la résistance du film côté jus est nettement plus pénalisante.

5. Coefficient global d'échange

Le coefficient global est ramené à la surface intérieure des tubes :

$$1/U_i = 1/h_i + Rfi + (Di / 2\lambda p)\, \ln(Do/Di) + (Di/Do)(Rfo + 1/h_o)$$

avec Do = 28 mm. Le calcul donne :

$$U_i \approx 667 \text{ W/(m².K)}$$

Résistance	Valeur approximative (m².K/W)
Film côté jus, 1/hi	0,001047
Encrassement jus, Rfi	0,000200
Paroi cylindrique	0,000088
Encrassement chaud ramené à Ai	0,000089
Film chaud ramené à Ai	0,000075

La résistance dominante est le film côté jus.

6. DTLM, surface d'échange et longueur des tubes

Pour l'eau chaude 110 -> 100 °C et le jus 69 -> 90 °C, les écarts terminaux sont 20 K et 31 K.

$$\Delta T_{lm} = 25{,}10 \text{ K}$$

$A = \dot{Q} / (U \Delta T_{lm}) = 45\,500 / (667 \times 25{,}10)$

$$A \approx 2{,}72 \text{ m}^2$$

La longueur intérieure totale correspondante vaut :

$$L_{tot} = A / (\pi Di) \approx 34{,}6 \text{ m}$$

Avec 4 tubes en parallèle :

$$L \text{ par tube} \approx 8{,}66 \text{ m}$$

7. Tube de maintien

Pour un diamètre intérieur de 50 mm et le même débit volumique, la vitesse dans le tube de maintien vaut environ 0,271 m/s.

Pour un temps de maintien moyen de 20 s :

$$L = V t \approx 0{,}271 \times 20 = 5{,}42 \text{ m}$$

En pratique, le dimensionnement sanitaire doit être basé sur le temps de séjour minimal et sur une validation du procédé, et non uniquement sur le temps moyen calculé.

8. Refroidissement et bilan global

La charge thermique brute pour refroidir le jus de 90 à 25 °C est :

$$\dot{Q}_{froid} = \dot{m} Cp (90 - 25) = 140{,}8 \text{ kW}$$

9. Tableau de synthèse

Résultat principal	Valeur
Débit volumique	1,91 m³/h
T après régénération	69 °C
Puissance sans récupération	151,7 kW
Puissance récupérée	106,2 kW
Puissance primaire	45,5 kW
Re jus / Nu jus	4 421 / 41,18
hi jus	955 W/(m².K)
ho eau chaude	11 828 W/(m².K)
Ui global	667 W/(m².K)
DTLM	25,10 K
Surface nécessaire	2,72 m²
Longueur totale de tubes	34,6 m

Résultat principal	Valeur
Longueur par tube (4 tubes)	8,66 m
Tube de maintien 50 mm - 20 s	5,42 m
Charge brute de refroidissement	140,8 kW

Interprétation : dans ce cas, l'augmentation de h_o côté eau chaude apporterait un gain limité car la résistance dominante est du côté jus. Les leviers principaux sont la vitesse du jus, le nombre et le diamètre des tubes, l'état d'encrassement et la configuration de l'échangeur.

Avertissement : cette étude est un support pédagogique et un pré-dimensionnement thermique. Les conditions réelles de pasteurisation doivent être validées pour le jus, le pH, le microorganisme cible, le procédé, le profil de vitesse et les exigences sanitaires applicables.