

PEREKAYASAAN HEAT EXCHANGER SEBAGAI PEMANAS UMPAN UF₆ DALAM PABRIK ELEMEN BAKAR NUKLIR

P. Zacharias, M. Pancoko
PRPN-BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong, TangSel, Banten, 15310

ABSTRAK

PEREKAYASAAN HEAT EXCHANGER SEBAGAI PEMANAS UMPAN UF₆ DALAM PABRIK ELEMEN BAKAR NUKLIR. Proses konversi UF₆-UO₂ melalui Jalur Kering Terintegrasi (JKT) dilakukan dalam reaktor rotary kiln. Ada dua tahapan perlakuan/pengkondisian awal sebelum umpan UF₆ dimasukkan ke reaktor, yaitu pertama, mengubah UF₆ padat menjadi fase gas suhu 60°C dalam sebuah evaporator, kemudian kedua menaikkan suhu UF₆ gas dari 60°C menjadi 290°C dalam sebuah Heat Exchanger (HE). Oleh karena itu perlu didesain sebuah HE yang berfungsi sebagai pemanas umpan UF₆ gas. Kegiatan desain HE ini berupa penentuan/perhitungan spesifikasi HE sebagai pemanas. Langkah-langkah kegiatan penentuan spesifikasi HE mengikuti urutan sebagai berikut : menentukan nilai beban panas Q, menentukan perkiraan dimensi Heat Exchanger, menentukan dimensi/spesifikasi terkoreksi Heat Exchanger, dan menghitung pressure drop HE. Spesifikasi HE yang dihasilkan adalah Jenis double pipe HE hairpin dengan panjang 12 ft, 2 x 1 ¼ IPS. Material pipa adalah Inconel (alloy -600) yang tahan terhadap UF₆, HF, dan Steam. Annulus terbuat dari baja karbon. Penurunan tekanan dalam annulus sebesar 0,0004 psi, dan dalam pipa 0,042 psi. Heat Exchanger dengan spesifikasi seperti ini dapat difungsikan sebagai pemanas UF₆ gas sehingga suhunya naik dari 60°C menjadi 290°C.

Kata kunci : Heat Exchanger, UF₆ gas, steam, Spesifikasi HE

ABSTRACT

DESIGN OF HEAT EXCHANGER FOR HEATING UF₆ FEED IN NUCLEAR FUEL ELEMENT PLANT. The process of conversion of UF₆ to UO₂ through Integrated Dry Route (IDR) is done in a rotary kiln reactor. There are two stages of initial treatment / conditioning before inserting the UF₆ in to the reactor : changing UF₆ solid into the gas phase at a temperature of 60°C in an evaporator, and then, raising the temperature of UF₆ gas from 60°C to 290°C in a Heat Exchanger (HE). Therefore it is necessary to design a HE for heating UF₆ gas by determination / calculation of HE specifications as a heater. The steps activities of determining the specifications of HE in the following sequence: determining the value of the heat load Q, determining the approximate dimensions of the Heat Exchanger, determining the dimensions / specifications corrected Heat Exchanger, HE pressure drop calculation. The result of this design specification is a type of hairpin double pipe HE with a length of 12 ft, 2 x 1 ¼ IPS. Pipe material is Inconel (alloy -600) that is resistant to UF₆, HF, and Steam. Annulus material is carbon steel. Pressure drop in annulus is 0.0004 psi, and in inner pipe is 0.042 psi. Heat Exchanger with specs like this can function as UF₆ gas heater so that the temperature be 290°C.

Key word : Heat Exchanger, UF₆ gas, steam, HE specification

1. PENDAHULUAN

Desain pabrik elemen bakar untuk memproduksi UO₂ dari umpan UF₆ menggunakan dua jalur konversi UF₆-UO₂, yaitu jalur amonium uranil karbonat (AUK) dan jalur kering terintegrasi (JKT). Proses AUK lebih panjang jalurnya, peralatan/unit operasi yang digunakan lebih banyak, demikian juga dengan bahan kimia yang diperlukan dan berakibat sisa produk yang perlu

diolah agar ramah lingkungan juga banyak. Proses JKT jalurnya lebih singkat, peralatan/unit operasi yang digunakan lebih sedikit, dan berarti bahan proses dan sisanya juga lebih sedikit. Karena itu dapat dikatakan proses konversi UF₆-UO₂ melalui jalur kering terintegrasi lebih ramah lingkungan. Meskipun demikian, di negara produsen bahan bakar seperti

Korea Selatan, ke dua jalur proses ini digunakan secara paralel.

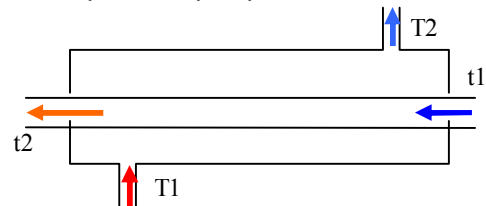
Pada proses JKT, konversi UF_6-UF_6 dilakukan dalam reaktor *rotary kiln*. Umpam yang masuk ke reaktor adalah UF_6 gas, oleh karena itu sebelumnya perlu dilakukan penyiapan umpam untuk mengubah UF_6 padat menjadi fase gas. Perubahan fase ini dilakukan dalam alat *autoclave* (evaporator) dengan pemanas CCl_4 . Kemudian UF_6 gas dinaikkan suhunya menjadi $290^{\circ}C$ dalam alat penukar panas, selanjutnya diumpamkan ke reaktor. Dalam reaktor terjadi reaksi hidrolisa UF_6 oleh uap air menghasilkan UO_2F_2 , kemudian dilanjutkan dengan reduksi UO_2F_2 menjadi UO_2 oleh gas H_2 yang dialirkan dari unit pemanas. Produk utama UO_2 serbuk ke luar dari reaktor langsung masuk ke *hooper* dan *glovebox* untuk menunggu proses selanjutnya. Produk lain atau produk samping yang ke luar dari reaktor dan perlu pengelolaan khusus untuk rekoveri atau dijadikan limbah adalah UF_6 gas, HF, H_2O uap, H_2 , dan ikutan UO_2 .

Proses JKT minimal menggunakan 4 alat penukar panas, dua berfungsi sebagai pemanas (heater) untuk pengondisian awal umpam dan pemanas H_2 , dan dua lagi sebagai unit pengolah produk samping sebagai *cooler* dan kondensor. Pemanasan UF_6 gas dan H_2 ini penting untuk mencapai suhu reaksi di dalam reaktor *rotary kiln* [1]. Karena itu, perlu didesain alat penukar panas yang sesuai dengan kebutuhan proses konversi UF_6-UF_6 , khususnya pada jalur kering terintegrasi. Perhitungan spesifikasi desain alat penukar panas mengacu ke buku Kern, "Process Heat Transfer" [2], sedangkan peralatan mekanik sesuai dengan *Mechanical Standards* TEMA [3] dan IPS-E-PR-775 "Process Design of Double Pipe Heat Exchangers" [4]. Alat penukar panas untuk proses produksi bahan bakar nuklir masuk kelas B *Mechanical Standards* TEMA. Jenis *Heat Exchanger* (HE) yang akan digunakan dalam desain ini adalah *Double pipe Heat Exchanger* atau

Shell and Tube Heat Exchanger bergantung pada *flow area* yang diperlukan oleh proses.

2. TEORI

Double Pipe Heat Exchanger berisikan pipa atau beberapa pipa yang mempunyai *shell* (*annulus*) sendiri-sendiri. Aliran fluida searah atau lawan arah dapat digunakan, baik fluida panas maupun dingin dalam *shell* dan fluida lain dalam pipa. Untuk keperluan praktis, alat ini berbentuk pipa U dan bagian luarnya diberi sirip untuk meningkatkan pemindahan panas. Keistimewaan jenis ini selain sederhana adalah mampu beroperasi pada tekanan tinggi, dan karena tidak ada sambungan, resiko tercampur kedua fluida sangat kecil. Kelemahannya terletak pada kapasitas perpindahan panasnya sangat kecil. [3,4] Sketsa *Heat Exchanger* untuk aliran fluida lawan arah seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Aliran fluida lawan arah pada HE.

Sebuah *Shell and Tube Heat Exchanger* terdiri dari sebuah *shell* silindris (badan *Heat Exchanger*) yang di dalamnya terdapat sejumlah *tube* (*tube bundle*) yang disusun dengan pola tertentu. Tipe susunan *tube* yang banyak digunakan adalah *In-line Square Pitch*, *In-line Triangular Pitch*, *Diamond Square Pitch* dan *Triangular Pitch*. Temperatur aliran fluida di dalam *tube bundle* berbeda dengan di luar *tube* (di dalam *shell*) sehingga terjadi perpindahan panas melalui dinding *tube* antara aliran fluida di dalam *tube* dan di luar *tube*. Dengan demikian, luas permukaan perpindahan panas bergantung pada jumlah *tube*/pipa dalam *shell*. Jenis material pipa dan ketebalan harus sesuai dengan karakter

fluida dan kondisi operasinya. Daerah yang berhubungan dengan bagian dalam *tube* disebut dengan *tube side* dan yang di luar *tube* disebut *shell side*.^[3,4]

Perekayasaan *heat exchanger* untuk menentukan spesifikasinya dihitung dengan urutan persamaan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Urutan Persamaan untuk Menentukan Spesifikasi *Heat Exchanger*

a. Menentukan beban panas (Q) :	
$Q = WC (T_1 - T_2) = wc (t_2 - t_1) \quad (1)$	
b. Menentukan beda temperatur logaritmik, (ΔT_{LMTD}):	
$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)} \quad (2)$	
c. Menentukan luas perpindahan panas sementara, (A_s):	
$A_s = \frac{Q}{U_D \Delta t} \quad (3)$	
Parameter di pipa annulus dan inner mengikuti persamaan di bawah ini:	
Annulus	Inner Pipe
d. Kecepatan massa, (G)	
$G_a = W/a_a \quad (4a)$	$G_p = W/a_p \quad (4b)$
e. Bilangan Reynolds, (Re):	
$Re_a = \frac{De \times Ga}{\mu} \quad (5a)$	$Re_p = \frac{DGp}{\mu} \quad (5b)$
f. Koefisien transfer panas fluida, (h):	
$h_o = J_H \frac{k}{De} \left(\frac{c \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \quad (6a)$	$h_i = J_H \frac{k}{D} \left(\frac{c \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \quad (6b)$
g. Koefisien transfer panas di dinding luar pipa inner, (h_{io}):	
$h_{io} = h_i \times \frac{ID1}{OD1} \quad (7)$	
h. Koefisien keseluruhan perpindahan panas bersih, (U_c):	
$U_c = \frac{h_{io} \times h_o}{h_{io} + h_o} \quad (8)$	
i. Koefisien keseluruhan perpindahan panas desain, (U_d):	
$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + Rd \text{ min} \quad (9)$	
j. Faktor pengotoran, (Rd):	
$R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c \times U_D} \quad (10)$	
k. <i>Pressure drop</i> dalam feet, (ΔF):	
$\Delta F_a = \frac{4fG_a^2 L}{2g\rho^2 D_e} \quad (11a)$	$\Delta F_p = \frac{4fG_p^2 L}{2g\rho^2 D} \quad (11b)$
l. <i>Pressure drop</i> dalam psi, (ΔP):	

$$\Delta Pa = \frac{(\Delta Fa + Fi) \times \rho}{144} \quad (12a)$$

$$\Delta Pp = \frac{(\Delta Fp + Fi) \times \rho}{144} \quad (12b)$$

3. METODE PEREKAYASAAN

Hal pertama yang harus ditentukan dalam mendesain HE adalah material yang digunakan untuk HE. Material/ bahan untuk *shell* dan *tube* (pipa) perlu dipilih /ditentukan agar sesuai dengan fluida yang akan mengalir. Yang menjadi pertimbangan antara lain sifat kimia fluida terhadap material yang digunakan, seperti sifat korosi dan *embrittlement* hidrogen. Fluida korosif dialirkan dalam pipa, sedangkan yang tidak korosif dalam *shell*.

Selanjutnya penentuan spesifikasi HE yaitu menentukan jenisnya dengan menghitung luas permukaan perpindahan panas dan perhitungan lainnya menggunakan persamaan pada Tabel 1, sampai didapat spesifikasi rinci HE yang sesuai.^[4]

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

UF₆ padat akan mengalami penyubliman setelah melewati *triple point*-nya di temperatur 56°C. UF₆ umpan dikondisikan pada temperatur 60°C untuk mendapatkan fase gas dengan tekanan yang cukup untuk dapat mengalir ke *rotary kiln* melewati HE^[1]. UF₆ gas ke luar dari *heat exchanger* bersuhu 290°C dan langsung masuk ke reaktor.

Data kondisi fluida yang mengalir dalam *heat exchanger* yang akan didesain ditampilkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Data Fluida yang mengalir di dalam HE

Fluda dingin	
Nama fluida	UF ₆ gas
Debit (w)	74 kg/hr (163lb/hr)
Suhu masuk (t ₁)	60°C (140°F)
Suhu keluar (t ₂)	290°C (554°F)
Fluda panas	
Nama fluida	Superheated steam
Debit (w)	5.5 kg/hr (12lb/hr)
Suhu masuk (T ₁)	304°C (580°F)
Suhu keluar (T ₂)	304°C (580°F)

4.1 Menentukan material HE

Material/ bahan *heat exchanger* untuk *shell* dan *tube* (pipa) perlu dipilih /ditentukan agar sesuai dengan fluida yang akan mengalir. Fluida pemanas yang akan digunakan adalah uap air (*steam*) dan UF₆ yang menerima panas. Karena itu harus dipilih material yang tahan uap air dan UF₆ gas, terutama ketahanan terhadap korosi dan *embrittlement* hidrogen. Dari literatur proses konversi UF₆-UO₂ dan UF₆ – UF₄^[5], bahan pada alat unit operasi umumnya menggunakan Inconel (*alloy-600*). Karena UF₆ gas melalui *tube* / pipa, maka bahan pipa harus terbuat dari Inconel, sedangkan bahan *annulus* (*shell*) pada HE agar lebih murah dapat menggunakan baja karbon. Baja karbon juga tahan korosi uap air. *Steam* akan mengalir dalam *annulus* sebagai fluida panas dan UF₆ gas mengalir dalam pipa (*inner pipe*) sebagai fluida dingin.

4.2 Menentukan jenis Heat Exchanger

Dari persamaan (1) beban panas dapat dihitung dan didapat Q = 6894 Btu/hr, dan dari persamaan (2) dan (3), didapat ΔT_{LMTD} = 146°F dan As = 15.7 ft². Karena penampang perpindahan panas (As) < 200 ft², maka jenis HE yang dipilih adalah *double pipe*.^[2]

Dimensi pipa diambil yang paling kecil untuk jenis *double pipe* seperti ditampilkan pada Tabel 3, karena debit fluida yang mengalir tidak terlalu besar.

Tabel 3. Dimensi pipa baja (IPS) yang digunakan pada desain ini

Inner Pipe	ID1(inc)	OD1(inc)
1 ¼	1.38	1.66
Outer Pipe	ID2	OD2
2	2.067	2.38

Aliran fluida di dalam *double pipe* HE ditentukan; UF₆ gas yang korosif di dalam *inner pipe* dan *steam* di dalam *outer pipe*.

4.3 Menentukan koefisien perpindahan panas dan spesifikasi rinci HE.

Dari persamaan (4) ~ (7) didapat nilai parameter seperti pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Hasil perhitungan persamaan (4) ~ (7)

Parameter	Inner	Annulus
Kecepatan massa (G)	15690	1413
Bilangan Reynolds (Re)	30130	854
Koef. transfer panas (h)	5.3	8.3
Koef. transfer panas dinding luar inner pipe (h_{io})	4.4	

Sehingga koefisien keseluruhan perpindahan panas bersih (U_c) dan desain (U_d) dapat dihitung dengan persamaan (8) dan (9), yaitu $U_c = 2.9$ Btu/hr.ft².F dan $U_d = 2.3$ Btu/hr.ft².F. Harga di atas tercapai dengan kondisi *double pipe* HE disusun seri 2 pipa *hairpin* 12 ft, dengan total panjang 48 ft dan luas penampang perpindahan panas $A = 21$ ft².

4.4 Menentukan kelayakan HE

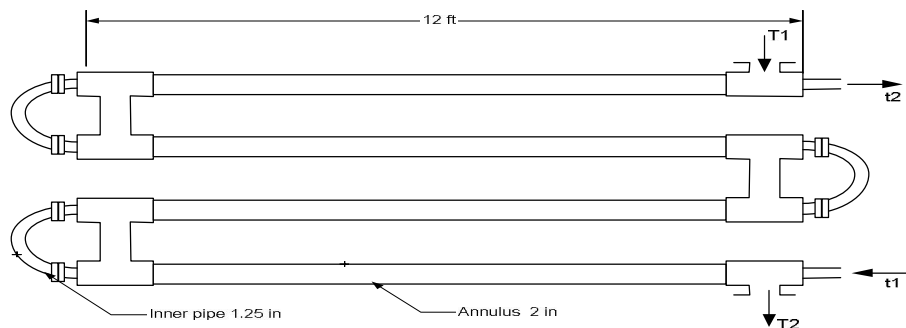
Kelayakan HE dapat ditentukan dari nilai *pressure drop* (ΔP) yang terjadi di dalam pipa *annulus* maupun *inner pipe*.

Untuk fluida gas, *pressure drop* yang terjadi harus kurang dari 2 psi. Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12), nilai *pressure drop* di *annulus* dan *inner pipe* dapat dihitung, yaitu masing-masing 0.0004 psi dan 0.042 psi. Dilihat dari kedua nilai *pressure drop* ini *Heat Exchanger* yang dirancang dapat diterima.

5. KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan, maka didapatkan spesifikasi *Heat Exchanger* sebagai berikut :

- Fungsi : Sebagai *Heater*, menaikkan temperatur UF₆ gas dari 60°C menjadi 290°C
- Jenis : *Double pipe*
- Material : Bahan pipa adalah *Inconel (alloy - 600)* tahan terhadap UF₆, HF, dan *Steam*, *annulus* terbuat dari baja karbon
- Size : *Hairpin* 2" x 1 ¼" IPS, 12ft disusun 2 pipa seri , total panjang 48ft.
 A total : 21 ft²
 U_c : 2,9 Btu/jam.ft².F
 U_D : 2,3 Btu/jam.ft².F



Gambar 2. *Double pipe Heat Exchanger* untuk memanaskan UF₆ gas

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BAMBANG GALUNG SUSANTO, dkk., Prastudi Kelayakan Pabrik Elemen Bakar Nuklir Tipe Presurizer Water Reactor (PWR) di Indonesia, Rev.1, 2009
- [2]. RICHARD C. BYRNE, Standard of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 25 North Broadway, Tarrytown, NY 10591, 1998.
- [3]. IPS-E-PR-775, "Engineering Standard for Process Design of Double Pipe Heat Exchangers, Original Edition, 1995.
- [4]. KERN, DONALD Q., " Process Heat Transfer ", McGraw – Hill Kogakusha, LTD, 1965.
- [5]. Anonymous, Plant and Equipment for the Conversion of Uranium, Special Designed or Prepared Systems for the Conversion of UF₆ to UO₂, and UF₆ to UF₄, April 1999.
- [6]. R. DEWITT, Uranium Hexafluoride : a Survey of the Physico-Chemical Properties, August 12, 1960

7. SIMBOL

Q	: beban panas HE, Btu/hr
W	: laju alir massa fluida panas, lb/hr
w	: laju alir massa fluida dingin, lb/hr
C	: kapasitas panas fluida panas, Btu/lb.F
c	: kapasitas panas fluida dingin, Btu/lb.F
T ₁	: suhu masuk fluida panas. °F
T ₂	: suhu keluar fluida panas. °F
t ₁	: suhu masuk fluida dingin. °F
t ₂	: suhu keluar fluida dingin. °F
Δt ₁	: T ₁ – t ₂
Δt ₂	: T ₂ – t ₁
U _D	: Perpindahan panas keseluruhan desain
U _c	: Perpindahan panas keseluruhan bersih
A	: Luas permukaan perpindahan panas, ft ²
D ₂	: Diameter dalam <i>outer pipe</i> , ft
D ₁	: Diameter dalam <i>inner pipe</i> , ft
a _a	: Flow area, ft ²
De	: Diameter ekivalen, ft
G	: Kecepatan massa, lb/hr.ft ²
μ	: viskositas fluida, lb/hr.ft
Re	: Bilangan Reynolds
J _H	: Konstanta untuk menghitung ho, hi
k	: Konduktifitas panas, Btu/hr.ft ² .(F/ft)
ho	: Koefisien <i>outside film</i> , Btu/hr.ft ² .F
hi	: Koefisien <i>inside film</i> , Btu/hr.ft ² .F
L	: Panjang pipa HE, ft
Rd	: Faktor pengotor
ρ	: Densitas fluida, lb/ft ³
ΔF	: <i>Pressure drop</i> , ft
V	: Kecepatan fluida, ft/s
ΔP	: <i>Pressure drop</i> , psi

ΔT_{LMTD} : *Log Mean Temperature Difference*, F