1. Csőkemence

A csőkemence egy olyan kemence, amely felmelegíti az egymáshoz kapcsolódó csősorok segítségével az anyagot. Ezeket a csősorokat gázzal vagy fűtőolajjal szokás fűteni. A kemencék terét a hőközlés módja szerint nevezhetjük konvekciósnak vagy radiációsnak. Mivel a technológia megköveteli a nagy hőátadásra alkalmad berendezést így csőkemencét kell alkalmaznunk. A legjobb kemencék hatásfoka elérheti a 92%-os vagy akár nagyobb teljesítményt is, de az ipari átlag 86%.

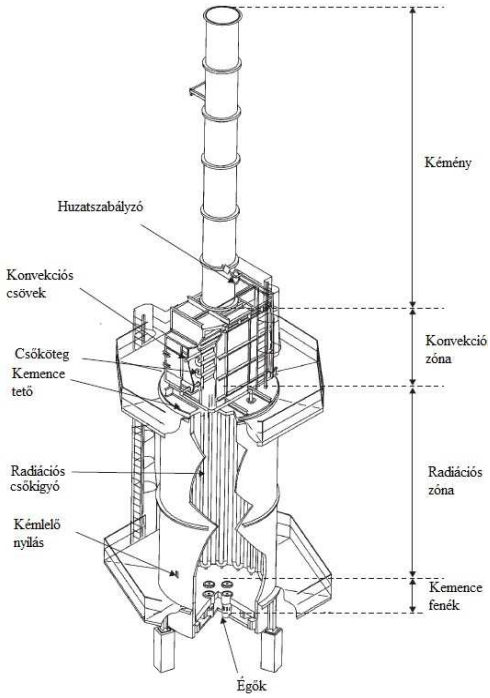
A csőkemencéket az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- Típusa szerint
  - alak szerint
    - kör alakú
    - téglatest alakú
  - elrendezés szerint
    - vertikális
    - horizontális
  - hőátszármaztatás jellege szerint
    - radiációs
    - konvekciós
    - radiációs és konvekciós
- Technológiai funkció szerint
  - atmoszférikus desztilláció
  - vákuum desztilláció
  - hidrokrakkolás
  - katalitikus folyamatok (heteroatom eltávolítás, katalitikus krakkolás, katalitikus reformálás, izomerizálás)
  - visszaforralás

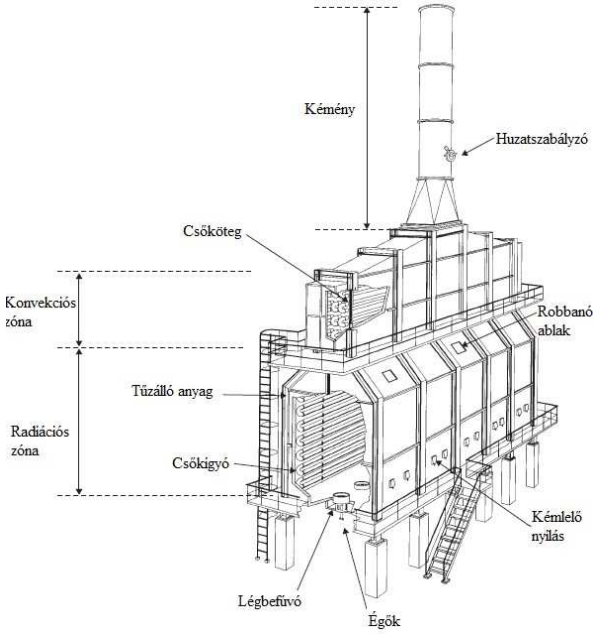
A csőkemencékben egy bizonyos mennyiségű levegőt biztosítani kell. Ezt a kéményen keresztül tudjuk megtenni huzat segítségével.

A csőkemencék két fő részből állnak. Az egyik a csöveket tartalmazó tér, ahol megtörténik a hőátadás, míg a másik az égető kamra, ahol a tüzelőanyagot elégetik és így nagy mennyiségű hő szabadul fel. A csőkemencékbe párhuzamosan kapcsolt csőkígyókat építenek be, amelyek elrendezése lehet vertikális vagy horizontális. A vertikális vagy függőleges elrendezésű

kemencékbe lentről felfelé irányul a láng. Ezeknek a típusoknak a mérete kisebb ugyanis az égési zóna is részt vesz a huzat kialakításában. Azonban a horizontális vagy vízszintes kialakítású kemencék alacsonyabbak és a csöveket az elrendezés miatt könnyebb tisztítani és szerelni.



1. ábra Vertikális csőkemence



2. ábra Horizontális csőkemence

A csőkemence csövei közé fordulókamrákat helyeznek el azért, hogy megkönnyítsék a csövek belsejének a tisztítását és esetleges szerelését vagy cseréjét anélkül, hogy a teljes egészet meg kelljen bontani. A csöveket tartalmazó egység két részből áll. Ezek a radiációs és a konvekciós tér. A konvekciós zónában a csöveket az égési térből távozó füstgázok melegítik, míg a radiációs térben a csövek közvetlenül érintkeznek a lánggal. A füstgázok a konvekciós zóna után eljutnak a kéménybe, majd onnan a szabadba távoznak. Az égőtérbe megfelelő nyomást és levegőmennyiséget kell biztosítani, amit a kémény huzata segítségével érhetünk el. Mivel a füstgázoknak jelentős a korróziós tulajdonsága így, figyelnünk kell arra is, hogy a környezetet ne károsítsa. Ebben az esetben figyelnünk kell a megfelelő kémény magasságra. A csőkemencék külső falazatát általában acél vázszerkezet alkotja, míg a belső falai többrétegűek. Belülről tűzálló (samott) téglával, kívülről pedig szigetelő téglával van felépítve.

1.1 A technológia csőkemencéinek méretezés

A továbbiakban a F4-es jelű csőkemence tervezését mutatom be részletesen.

A csőkemence méretezéséhez ismerni kell az alapadatokat. Úgymint a felmelegítendő anyag mennyiségét, hőmérsékletét, nyomását és fajhőjét. Emellett pedig biztosítania kell azt a hőmennyiséget, amely lehetővé teszi az áramló anyag megfelelő hőmérsékletre melegítését.

A csőkemence alapadatait a szimuláció után kaptam meg. Az alapadatokat az 1.1. Táblázat tartalmazza.

1.1. táblázat A F4-es jelű csőkemence alapadatai

Anyagáram	kg/h	19102,7
Fajhő (cp)	kJ/kg°C	3,400065
T_{be}	°C	380
T_{ki}	°C	550
ΔT	°C	170
p_{be}	bar	20
p_{ki}	bar	20
Δp	bar	0
H_{be}	kJ/kg	3229,57
H_{ki}	kJ/kg	2686,73

A technológia üzemeltetéséhez fűtőgázt választottam. Szakirodalom alapján a fűtőgáz tüzelésű csőkemencék 15-20%-os levegőfelesleggel működnek. Én a technológia működtetéséhez 20%-os levegőfelesleget választottam.

1.2 Méretezési számítások

A csőkemence tervezése az API 560-as szabvány szerint történt [1]. A szabvány angolszám mértékegységeket használ, a fontosabb paramétereket SI mértékegységbe váltottam át.

A konvekciós térbe való belépésnél a füstgázok hőmérséklete és a csőfal között a legnagyobb megengedett hőmérséklet különbség 300°F. Utána kokszolódás üzemzavar és leállás is bekövetkezhet.

A füstgáz hőmérséklete:

$$716°F + 300°F = 1016°F = 546{,}67°C \tag{1.1}$$

A felmelegítéshez szükséges hőmennyiség számítása:

$$\begin{aligned} Q_{teljes} = c * m * \Delta T = 3{,}400065 \frac{kJ}{kg°C} * 19102{,}7 \frac{kg}{h} * 170°C \\ = 11{,}04 * 10^6 \frac{kJ}{h} = 10{,}47 * 10^6 \frac{BTU}{hr} \end{aligned} \tag{1.2}$$

Hasznos teljesítmény:

$$P_{teljes} = \frac{11{,}04 * 10^6 \frac{kJ}{h}}{3600} = 3066{,}67kW = 3{,}067MW \tag{1.3}$$

Majd a következő lépésben meg kell becsülni a kemence hatásfokát, amely a füstgáz és a légfelesleg hőmérsékletének az ismeretében 70%-nak adódott.

Hatásfok alapján szükséges hőmennyiség:

$$\begin{aligned} Q_{szükséges} = \frac{Q_{teljes}}{\eta} = \frac{10{,}47 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{0{,}7} = 14{,}96 * 10^6 \frac{BTU}{hr} \\ = 15{,}78 * 10^6 \frac{kJ}{h} \end{aligned} \tag{1.4}$$

Hatásfok alapján a csőkemence összteljesítménye:

$$P_{szükséges} = \frac{P_{teljes}}{\eta} = \frac{3066{,}67kW}{0{,}7} = 4380{,}95kW = 4{,}38MW \tag{1.5}$$

Levegőfelesleg és a tüzelőanyag típusának ismeretében a füstgáz mennyisége:

$$m_{füstgáz} = 975\frac{lb}{MMBTU} * Q_{szükséges} = 975\frac{lb}{MMBTU} * 14{,}96\frac{MMBTU}{hr} = 14586\frac{lb}{hr} = 4{,}052\frac{lb}{s} = 1{,}84\frac{kg}{s} \tag{1.6}$$

1.3 A radiációs zóna méretezése

A csőkemencében radiációval 70% adódik át.

Radiációval átadott hő mennyiségének számítása:

$$Q_{rad-elm} = Q_{szükséges} * 0{,}7 = 14{,}96 * 10^6\frac{BTU}{hr} * 0{,}7 = 10{,}472 * 10^6\frac{BTU}{hr} = 11{,}05 * 10^6\frac{kJ}{h} \tag{1.7}$$

A technológiára vonatkozó radiációval átadható hőmennyiség a szabvány alapján 11000 BTU/hrft^2:

$$Q_{rad} = 11000\frac{BTU}{hrft^2} \tag{1.8}$$

Szükséges radiációs felület számítása:

$$A_{rad} = \frac{Q_{rad-elm}}{Q_{rad}} = \frac{10{,}472 * 10^6\frac{BTU}{hr}}{11000\frac{BTU}{hrft^2}} = 952ft^2 = 88{,}44m^2 \tag{1.9}$$

1.3.1 A csőkemence szerkezete

A csőkemence szerkezetét 8 járatúra választottam az átadandó hőmennyiség figyelembe vétele után. A horizontális csőkemence széles körben elterjedt. Előnye, hogy a hőterhelés a csövek mentén közel azonos, míg hátránya, hogy csövei vízszintesek így nagyobb a mechanikai igénybevétel. A csőkemence falazata cél vázszerkezetből és samott téglából áll.

A csövek kiválasztása

A szerkezeti anyag kiválasztásánál figyelembe kellett vennem, hogy az anyagomban magas a hidrogén tartalom, illetve nagy hőterhelésnek kell ellenálljon. A szerekezeti anyagot ausztenites

króm-nikkel acél titán adalékkal stabilizálják. Ez jól ellenáll a korróziónak, szerves és szervetlen savaknak. Jó a hegeszthetősége és a hidegalakíthatósága. A hőátadás hatásfokát úgy tudjuk növelni, ha figyelünk arra, hogy a csövekben az áramlás turbulens legyen. Így csökken a kokszolódás esélye.

A csőkemencébe beépítendő csövek típusát és paramétereit a 2. Táblázatba foglaltam össze.

1.2. táblázat Csőparaméterek

Külső csőátmérő (D_k)	in	2,375
Belső csőátmérő (D_b)	in	1,689
Falvastagság	in	0,343
Egységnyi csőfelület ($A_{egységnyicső}$)	ft^2/ft	0,622
Csőkeresztmetszet ($A_{cső}$)	ft^2	0,0155
Fluidum áramlási sebessége (v_h)	ft/s	4,19
Könyökhossz	ft	0,35

A csövekben áramló fluidum tömegáramának meghatározása:

$$G_{fluid} = \frac{m}{3600 * n_{járat} * A_{cső}} = \frac{42114{,}21\frac{lb}{hr}}{3600 * 8 * 0{,}0115 ft^2} = 94{,}34\frac{lb}{sft^2} \qquad (1.10)$$

Beépítendő szükséges csőhossz számítása:

$$l_{cső-összes-elm.} = \frac{A_{rad}}{A_{egységnyicső}} = \frac{952 ft^2}{0{,}622\frac{ft^2}{ft}} = 1530{,}55 ft = 466{,}51 m \qquad (1.11)$$

A horizontális felépítésű csőkemencékben átalagosan használt 32 ft, azaz 9,75m ($l_{cső}$) csőhosszúságot feltételeztem, így a beépítendő csövek száma:

$$n_{rad-cső} = \frac{l_{cső-összes-elm.}}{l_{cső}} = \frac{1530{,}55 ft}{32 ft} = 47{,}83 db \qquad (1.12)$$

$$n_{\frac{cső}{járat}} = \frac{n_{rad-cső}}{n_{járat}} = \frac{47{,}83db}{8} = 5{,}98 \cong 6\frac{db}{járat} \tag{1.13}$$

$$n_{rad-cső-összes} = n_{\frac{cső}{járat}} * n_{járat} = 6\frac{db}{járat} * 8járat = 48db \tag{1.14}$$

Egy cső ekvivalens hossza:

$$l_{cső-ekv} = l_{ekv-könyök} + l_{cső} = 0{,}35ft + 32ft = 32{,}35ft = 9{,}86m \tag{1.15}$$

Egy járatra eső csőhosszúság:

$$l_{\frac{cső}{járat}} = l_{cső-ekv} * n_{\frac{cső}{járat}} = 32{,}35ft * 6ft = 194{,}1ft = 59{,}16m \tag{1.16}$$

Csőkemencéhez szükséges teljes csőhosszúság:

$$l_{rad-cső-összes} = l_{\frac{cső}{járat}} * n_{járat} = 194{,}1ft * 8 = 1552{,}8ft = 203m \tag{1.17}$$

1.3.2 A radiációs zónába lépő fluidum hőmérsékletének becslése

A radiációs zónából kilépő fluidum becsült nyomása (p_{ki}): 20,0 bar = 290,075 psig

A radiációs zónából kilépő fluidum entalpiája (H_{ki}): 2686,73 kJ/kg = 1155,086 BTU/lb

Entalpia változása a konvekciós zónában:

$$\Delta H_{konv} = \frac{Q_{rad-elm}}{m} = \frac{10{,}472 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{42114{,}21\frac{lb}{hr}} = 248{,}67\frac{BTU}{lb} = 578{,}41\frac{kJ}{kg} \tag{1.18}$$

Entalpia a konvekciós-radiációs zóna határán:

$$H_{zónahatár} = H_0 - \Delta H_{konv} = 1155{,}086\frac{BTU}{lb} - 248{,}67\frac{BTU}{lb} = 906{,}43\frac{BTU}{lb} = 2108{,}36\frac{kJ}{kg} \tag{1.19}$$

így a hőmérséklet:

$$T_{fluid-zónahatár}: 443°C = 829{,}4°F \tag{1.20}$$

1.3.3 Nyomásesés becslése a radiációs zóna csöveiben

$$\frac{\Delta P}{100'} = \frac{0{,}517 * f * G^2}{D_b * \rho} \tag{1.21}$$

f = 0,004 ezen konstrukció esetén

Db – a cső belső átmérője, [in]

G – a fluidum tömegárama [lb/(sft^2)]

ρ – sűrűség

A sűrűségeket megbecsültettem, ezek alapján:

$$\frac{\Delta P}{100'} = \frac{0{,}517 * 0{,}004 * 94{,}34^2 \left(\frac{lb}{sft^2}\right)^2}{1{,}689in * 31{,}8\frac{lb}{ft^3}} = 0{,}343 \tag{1.22}$$

$$\frac{\Delta P}{100'} = \frac{0{,}517 * 0{,}004 * 94{,}34^2 \left(\frac{lb}{sft^2}\right)^2}{1{,}689in * 25{,}08\frac{lb}{ft^3}} = 0{,}434 \tag{1.23}$$

A logaritmikus közepes nyomásesés:

$$LM\Delta P = \frac{0{,}434 - 0{,}343}{ln\frac{0{,}434}{0{,}343}} = 0{,}387psig \tag{1.24}$$

A számított nyomásesés:

$$\Delta P = \frac{LM\Delta P}{100'} * l_{\frac{cső}{járat}} = \frac{0{,}387}{100} * 194{,}1 = 0{,}751psig = 0{,}0518bar \tag{1.25}$$

Átlagos hőmérséklet a radiációs zónában:

$$T_{fluid-rad-átlag} = \frac{T_{fluid-zónahatár} + T_{fluid-ki}}{2} = \frac{780°F + 1022°F}{2} = 901°F = 482{,}78°C \tag{1.26}$$

1.3.4 A radiációs zónában a csőfal hőmérséklete

Hőátszármaztatási tényező:

$$h = \frac{K}{D} * (\frac{C * Z}{K})^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{Z}{Z_W}\right)^{0,14} * \emptyset(\frac{D * G}{Z}) \tag{1.27}$$

h – a film hőátszármaztatási tényezője,

K – a film hővezetési tényezője,

D – a cső belső átmérője,

zw – abszolút viszkozitás centipoise-ban a csőfal átlagos hőmérsékletén

G – tömegáram,

C – a fluidum fajhője a közeg közepes hőmérsékletén,

Z – abszolút viszkozitás centipoise-ban a közeg átlagos hőmérsékletén

Reynolds-szám:

$$Re = \frac{D * G}{Z} = \frac{1{,}689in * 94{,}34\frac{lb}{sft^2}}{0{,}0615ctpoise} = 2590{,}89 \tag{1.28}$$

A módosított Re-szám a nomogramról leolvasva: 11000

$$h = \frac{0{,}0396\frac{BTU}{hrft^2\left(\frac{°F}{ft}\right)}}{1{,}689in} * \left(\frac{0{,}793\frac{BTU}{lb°F} * 0{,}0615ctpoise}{0{,}0396\frac{BTU}{hrft^2\left(\frac{°F}{ft}\right)}}\right)^{\frac{1}{3}} * 11000$$
$$= 276{,}43\frac{BTU}{ft^2hr°F} \tag{1.29}$$

Hőmérsékletkülönbség a filmben:

$$\Delta T_{rad-film} = Q_{rad} * \frac{D_k}{D_b} * \frac{1}{h} = 11000\frac{BTU}{hrft^2}\left(\frac{2{,}375in}{1{,}689n}\right)\frac{1}{276{,}43\frac{BTU}{ft^2hr°F}}$$
$$= 55{,}96°F \cong 13°C \tag{1.30}$$

Hőmérsékletkülönbség a csőfalban:

$$\Delta T_{rad-cső.fal} = Q_{rad} * \frac{D_k}{2 * k_{acél}} * \ln\left(\frac{D_k}{D_b}\right)$$
$$= 11000 \frac{BTU}{hrft^2}\left(\frac{2{,}375in}{2\left(6\frac{in}{ft} * 15{,}8\frac{BTU}{ft^2 hr°F}\right)}\right) * \ln\left(\frac{2{,}375in}{1{,}689in}\right)$$
$$= 46{,}97°F \cong 8°C \quad (1.31)$$

A teljes hőmérsékletkülönbség:

$$\Delta T_{rad(film+cső.fal)} = \Delta T_{rad-film} + \Delta T_{rad-cső\,fal} = 55{,}96°F + 46{,}97°F$$
$$= 102{,}93°F = 39{,}41°C \quad (1.32)$$

Így az átlagos fal hőmérséklete:

$$T_{rad-cső.fal-átlag} = T_{fluid-rad-átlag} + \Delta T_{rad(film+cső.fal)}$$
$$= 901°F + 102{,}93°F = 1003{,}93°F = 593{,}96°C \quad (1.33)$$

1.3.5 A radiációs zóna csőelrendezése

A csőelrendezést a 1.3. Táblázatban foglaltam össze:

1.3. táblázat Radiációs zóna csőelrendezése heurisztikák alapján

Csövek száma	db	48
Csövek hossza	m	9,75
Csövek látható hossza	m	9,3
Csövek ekvivalens hossza	m	9,3
Csövek középpontjának távolsága ($r_{tengely}$)	cm	30,48
Járatok száma	db	8
Csövek száma átfutásonként	db/átfutás	6
Árnyékoló csövek száma	db	8
Csövek és a fal közötti távolság	cm	6,03
Égők és a csövek közötti távolság	m	1,52

1.3.6 A tűztér hőmérsékletének számítása

Egy cső felülete:

$$A_{1-db-cső} = l_{látható} * A_{egységnyicső} = 30{,}51ft * 0{,}622\frac{ft^2}{ft} = 18{,}98ft^2 = 1{,}76m^2 \quad (1.34)$$

Az összes csőfelület:

$$A_{rad-összescső} = n_{rad-cső-összes} * A_{1-db-cső} = 911{,}04ft^2 = 84{,}66m^2 \quad (1.35)$$

Térkitöltési arány:

$$\frac{r_{tengely}}{D_k} = \frac{1ft}{\frac{2{,}375in}{12\frac{in}{ft}}} = 5{,}05 \quad (1.36)$$

Az árnyékoló csövek hideg felülete:

$$A_{rad-hid.árny} = l_{látható} * n_{árnycső} * r_{tengely} = 244ft^2 = 22{,}7m^2 \quad (1.37)$$

A fal melletti csövek felülete:

$$A_{rad-hid.fal} = l_{látható} * \left(n_{rad-cső-összes} * n_{árnycső}\right) * r_{tengely} = 1220{,}4ft^2 = 113{,}38m^2 \quad (1.38)$$

A teljes csőfelület számítása:

$$A_{rad-hid.összes} = A_{rad-hid.árny.} + \propto * A_{rad-hid.fal} = 866{,}404ft^2 = 80{,}49m^2 \quad (1.39)$$

A csőkemence teljes belső felülete:

$$A_{kemence-teljes} = 1580{,}4ft^2 = 146{,}82m^2 \quad (1.40)$$

A hővisszaverő belső falazat felülete:

$$A_{rad-hővisszavőfa} = A_{kemence-teljes} - A_{rad-hid.összes} = 713{,}996ft^2 = 66{,}33m^2 \quad (1.41)$$

$$\frac{A_{kemence-teljes}}{A_{rad-hid.összes}} = \frac{1580{,}4ft^2}{866{,}404ft^2} = 1{,}82 \tag{1.42}$$

A közepes sugárzási hossz (L) becslése a táblázat segítségével (1. Melléklet): a kemence dimenziói 5:15:30,5; Ehhez a dimenzióhoz az 1,8-as érték tartozik.

$$L = 1{,}8 * 5 = 9ft = 2{,}74m \tag{1.43}$$

A CO2 és a vízgőz parciális nyomása nomogramról a légfelesleg függvényében és a PL szorzat (2. Melléklet alapján):

$$P = 0{,}243\ atm = 0{,}246\ bar \tag{1.44}$$

$$PL = 0{,}243atm * 9\ ft = 2{,}187\ atm * ft = 0{,}67\ bar * m \tag{1.45}$$

Tegyük fel, hogy a tűztér hőmérséklete 1500 °F (816°C). Ezután nomogramokról (3. és 4. Melléklet) leolvastam az 1500 °F-hez és adott PL szorzathoz tartozó értéket, ami 800 °F-en 0,415-nek, 1000 °F-en pedig 0,435-nak adódott. A két értékből kaptam a PF értéket:

$$PF = 0{,}414 \tag{1.46}$$

$$F = 0{,}65 \tag{1.47}$$

$$A_{rad-hid.összes} * F = 866{,}404ft^2 * 0{,}65 = 563{,}16ft^2 = 52{,}32m^2 \tag{1.48}$$

$$\frac{Q_{szükséges}}{A_{rad-hid.összes} * F} = \frac{14{,}96 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{563{,}16ft^2} = 26564{,}39\frac{BTU}{hrft^2} \tag{1.49}$$

$$\frac{Q_{rad-valódi}}{A_{rad-hid.összes} * F} = \\ = \left[1 + \frac{Q_{levegő}}{Q_{szükséges}} + \frac{Q_{tüzelő.anyag}}{Q_{szükséges}} - \frac{Q_{rad-füst}}{Q_{szükséges}} - \frac{Q_{fal-veszt.}}{Q_{szükséges}}\right] \\ * \left[\frac{Q_{szükséges}}{A_{rad-hid.összes} * F}\right] \tag{1.50}$$

Tegyük fel, hogy nincsen sem levegő, sem tüzelőanyag előmelegítés, ekkor a 2. és 3. tag nulla lesz a képletben. Ilyen típusú csőkemencénél a kilépő füstgáz hőmérséklete azonosnak

tekinthető a tűztér hőmérsékletével. A Qrad-füst/Qszükséges az 5.Mellékletben található nomogramról olvasható le a levegő felesleg ismeretében.

$$\frac{Q_{rad-valódi}}{A_{rad-hid.összes} * F} = [1 + 0 + 0 - 0{,}42 - 0{,}02] * 26564{,}39 \frac{BTU}{hrft^2} = 14876{,}06 \frac{BTU}{hrft^2} \quad (1.51)$$

Majd a tűztér hőmérsékletét 1750°F-nek vettem és az előző lépéseket ismét végigszámoltam:

$$A_{rad-hid.összes} * F = 866{,}404 ft^2 * 0{,}63 = 545{,}83 ft^2 = 50{,}71 m^2 \quad (1.52)$$

$$\frac{Q_{szükséges}}{A_{rad-hid.összes} * F} = \frac{14{,}96 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{545{,}83 ft^2} = 27407{,}8 \frac{BTU}{hrft^2} \quad (1.53)$$

$$\frac{Q_{rad-valódi}}{A_{rad-hid.összes} * F} = [1 + 0 + 0 - 0{,}46 - 0{,}02] * 27407{,}8 \frac{BTU}{hrft^2} = 14252{,}06 \frac{BTU}{hrft^2} \quad (1.54)$$

A következő lépésben az előzőleg kapott adatok alapján számoltam tovább:

$$Q_{rad-valódi} = \left[1 - \frac{Q_{rad-füst}}{Q_{szükséges}} - \frac{Q_{fal-veszt.}}{Q_{szükséges}}\right] * Q_{szükséges} = [1 - 0{,}4 - 0{,}02] * 14{,}96 * 10^6 \frac{BTU}{hr} \quad (1.55)$$

$$Q_{rad-valódi} = 8{,}677 * 10^6 \frac{BTU}{hr} = 9{,}155 * 10^6 \frac{kJ}{h} \quad (1.56)$$

$$\frac{Q_{szükséges}}{A_{rad-összescső}} = \frac{8{,}677 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{911{,}04 ft^2} = 9524{,}06 \frac{BTU}{hrft^2} \quad (1.57)$$

Ezután kiszámoltam a közeg hőmérsékletét a zónahatáron:

Teljes entalpiaváltozás:

$$\Delta H = \frac{8{,}677 * 10^6 \frac{BTU}{hr}}{42114{,}21 \frac{lb}{hr}} = 206{,}03 \frac{BTU}{lb} = 479{,}23 \frac{kJ}{kg} \quad (1.58)$$

Az áram entalpiája a konvekcós-radiációs zóna határán:

$$H_{zónahatár} = H_0 - \Delta H = 1155{,}086 \frac{BTU}{lb} - 206{,}03 \frac{BTU}{lb} = 949{,}056 \frac{BTU}{lb} = 2207{,}5 \frac{kJ}{kg} \quad (1.59)$$

A fluidum átlagos hőmérséklete a radiációs zónában:

$$T_{fluid-rad-átlag} = \frac{T_{fluid-zónahatár} + T_{fluid-ki}}{2} = \frac{789°F + 1022°F}{2} == 905{,}5°F = 485{,}27°C \quad (1.60)$$

1.4 A konvekciós zóna méretezése

Elnyelt hőmennyiségek számítása

Konvekciós zóna hőigénye:

$$Q_{konv} = Q_{teljes} - Q_{rad-valódi} = 11{,}04 * 10^6 \frac{BTU}{hr} - 8{,}67 * 10^6 \frac{BTU}{hr} = 2{,}363 * 10^6 \frac{BTU}{hr} = 2{,}493 * 10^6 \frac{kJ}{h} \quad (1.61)$$

A kéményt elhagyó füstgáz hőtartalma/szükséges hőmennyiség:

$$\frac{Q_{konv-füst}}{Q_{szükséges}} = 1 + \frac{Q_{levegő}}{Q_{szükséges}} + \frac{Q_{tüzelő\ anyag}}{Q_{szükséges}} - \frac{Q_{rad-valódi} + Q_{konv}}{Q_{szükséges}} - \frac{Q_{fal-veszt}}{Q_{szükséges}}, ahol\ \frac{Q_{rad-valódi} + Q_{konv}}{Q_{szükséges}} = \eta \quad (1.62)$$

$$\frac{Q_{konv-füst}}{Q_{szükséges}} = 1 + 0 + 0 - 0{,}7 - 0{,}02 = 0{,}28 \quad (1.63)$$

Az 5. Mellékletben található nomogram szerint 0,28-hoz és a 20%-os levegő felesleghez($T_{konv-füst-ki}$) 1125°F tartozik.

Árnyékoló csöveken keresztüli veszteség (radiációs):

$$(1-\eta) * A_{rad-hid.árny} * F = (1-0{,}7) * 244ft^2 * 0{,}675 = 49{,}41ft^2 = 4{,}59m^2 \quad (1.64)$$

Konvekciós zónában lévő csőfal hőmérséklete:

$$T_{konv-cső.fal} = T_{fluid-zónahatár} + \Delta T_{rad(film+cső.fal)} = 789°F + 102{,}93°F = 891{,}93°F = 477{,}7°C \quad (1.65)$$

1.4.1 Az árnyékoló csöveken keresztüli radiációs veszteség

$$Q_{árny-veszt} = 16500\frac{BTU}{hrft^2} * 49{,}41ft^2 = 815265\frac{BTU}{hr} = 0{,}815 * 10^6\frac{BTU}{hr} \quad (1.66)$$

Árnyékoló csövek miatti veszteség:

$$0{,}4 - \frac{Q_{árny-veszt}}{Q_{szükséges}} = 0{,}4 - \frac{0{,}815 * 10^6\frac{BTU}{hr}}{14{,}96 * 10^6\frac{BTU}{hr}} = 0{,}346 \quad (1.67)$$

Majd 5.Melléklet segítségével meghatároztam a konvekciós zónába lépő füstgáz hőmérsékletét, amely 1300°F vagyis 704,44°C lett.

1.4.2 Hőmérsékleti viszonyok

Hőmérsékletkülönbség a konvekciós-radiációs zóna határán:

$$\Delta T_{zónahatár} = T_{füst-zónahatár} - T_{fluid-zónahatár} = 1400°F - 829{,}4°F = 570{,}6°F = 299{,}22°C \quad (1.68)$$

A hőmérsékletkülönbség a csőkemence bemeneténél:

$$\Delta T_{bemenet} = T_{konv-füst-ki} - T_{fluid-be} = 1125°F - 716°F = 409°F = 209{,}44°C \quad (1.69)$$

$$LMTD = \frac{570{,}6 - 409}{ln\frac{570{,}6}{409}} = 485{,}32°F = 251{,}84°C \quad (1.70)$$

A konvekciós zónában lévő fluidum átlaghőmérséklete:

$$T_{fluid-rad-átlag} = \frac{T_{fluid-be} + T_{fluid-zónahatár}}{2} = \frac{829{,}4°F + 716°F}{2} = 772{,}7°F = 411{,}5°C \quad (1.71)$$

$$T_{konv-cső.fal-átlag} = T_{fluid-konv-átlag} + 100 = 772{,}2°F + 100°F = 722{,}2°F = 467{,}05°C \quad (1.72)$$

Átlagos füstgázhőmérséklet a konvekciós zónában:

$$T_{konv-füst-átlag} = T_{fluid-konv-átlag} + LMTD = 772{,}2°F + 485{,}32°F = 1258{,}02°F = 681{,}12°C \quad (1.73)$$

Füstgáz átlaghőmérséklete:

$$T_{konv-füstfilm-átlag} = T_{fluid-konv-átlag} + \frac{1}{2} * LMTD = 772{,}7°F + \frac{1}{2} * 485{,}32°F = 1015{,}36°F = 546{,}31°C \quad (1.74)$$

1.4.3 A konvekciós zóna csőelrendezése

Teljes szélesség:

$$l_{konv-teljes} = \left(n_{\frac{cső}{sor}} + 0{,}5\right) * r_{tengely} = (8 + 0{,}5) * 12in = 102\ in = 2{,}59m \quad (1.75)$$

Szabad szélesség:

$$l_{konv-szabad} = l_{konv-teljes} - \left(n_{\frac{cső}{sor}} + D_k\right) = 102 - (8 * 2{,}375in) = 83in = 2{,}11m \quad (1.76)$$

Szabad keresztmetszet:

$$A_{konv-szabad} = l_{konv-szabad} * l_{látható} = \left(\frac{83in}{12\frac{in}{ft}}\right) * 30{,}51ft = 211{,}03ft^2 = 19{,}61m^2 \quad (1.77)$$

Füstgáz tömegárama egységnyi felületre: (G):

$$G_{füst} = \frac{m_{füst}}{A_{konv-szabad}} = \frac{4{,}052\frac{lb}{s}}{211{,}03ft^2} = 0{,}0192\frac{lb}{ft^2 s} \tag{1.78}$$

1.4.4 A film hőátszármaztatási tényezőjének korrigálása

A gázfilm hőátszármaztatási tényezője [BTU/(hrft^2°F)]-ban:

$$h_{cc} = \frac{2{,}14 * T_{konv-füstfilm-átlag}^{0{,}28} * G_{füstgáz}^{0{,}6}}{D_b^{0{,}4}} \tag{1.79}$$

$$h_{cc} = \frac{2{,}14 * (1015{,}36 + 460)^{0{,}28} * 0{,}0192^{0{,}6}}{1{,}689^{0{,}4}} = 1{,}25\frac{BTU}{hrft^{2}°F} \tag{1.80}$$

Hőátszármaztatási tényező átlagos füstgáz őmérsékleten:

$$h_{cr} = 2{,}35\frac{BTU}{hrft^{2}°F} \tag{1.81}$$

A hővisszaverő falazat radiációjából adódó hőátszármaztatási tényező (h_{cw}):

$$h_{cw} = 9{,}46 * \left(\frac{LMTD[°R]}{1000}\right)^3 = 9{,}46 * \left(\frac{485{,}32 + 460}{1000}\right)^3 = 7{,}99\frac{BTU}{hrft^{2}°F} \tag{1.82}$$

$$h_{cc} + h_{cr} + h_{cw} = 1{,}25 + 2{,}35 + 7{,}99 = 11{,}59\frac{BTU}{hrft^{2}°F} \tag{1.83}$$

Két egymás melletti sor csöveinek csőtengelytávolsága: (a):

$$a = cos30° * \frac{12in}{12\frac{in}{ft}} = 0{,}87ft = 0{,}26m \tag{1.84}$$

Egy csősorra vonatkoztatott falazatfelület:

$$A_{konv-\frac{fal}{sor}} = 2 * a * l_{látható} = 2 * 0{,}87ft * 30{,}51ft = 53{,}07ft^2 = 4{,}93m^2 \tag{1.85}$$

Egy csősorra vonatkoztatott csőfelület:

$$A_{konv-cső/sor} = n_{cső/sor} * l_{látható} * A_{egységnyicső} = 8 * 31{,}5ft * 0{,}622\frac{ft^2}{ft} \\ = 151{,}77m^2 = 14{,}1m^2 \quad (1.86)$$

A hővisszaverő falazatról származó radiáció faktora (f):

$$f = \frac{h_{cw}}{h_{cc} + h_{cr} + h_{cw}} * \left(\frac{A_{konv-\frac{fal}{sor}}}{A_{konv-\frac{cső}{sor}}}\right) = \frac{7{,}99}{11{,}59} * \left(\frac{53{,}07}{151{,}77}\right) = 0{,}241 \quad (1.87)$$

1.4.5 A teljes hőátszármaztatási tényező számítása

A füstgáz film teljes látszólagos hőátszármaztatási tényezője (h_c):

$$h_c = (1 + f) * (h_{cc} + h_{cr}) == (1 + 0{,}241) * \left(1{,}25\frac{BTU}{hrft^{2\circ}F} + 2{,}35\frac{BTU}{hrft^{2\circ}F}\right) \\ == 3{,}645\frac{BTU}{hrft^{2\circ}F} \quad (1.88)$$

A cső belsejében lévő film hőátszármaztatási tényezője (h):

$$h_{ci} = \frac{K}{D} * \left(\frac{C * Z}{K}\right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{Z}{Z_W}\right)^{0{,}14} * \emptyset\left(\frac{D * G}{Z}\right) \quad (1.89)$$

Reynolds-szám:

$$Re = \frac{D * G}{Z} = \frac{1{,}689in * 94{,}34\frac{lb}{sft^2}}{0{,}0524ctpoise} = 3040{,}84 \quad (1.90)$$

A módosított Re-szám a nomogramról leolvasva: 12000

$$h = \frac{0{,}0339\dfrac{BTU}{hrft^2\left(\frac{°F}{ft}\right)}}{1{,}689in} * \left(\frac{0{,}782\dfrac{BTU}{lb°F} * 0{,}0524ctpoise}{0{,}0334\dfrac{BTU}{hrft^2\left(\frac{°F}{ft}\right)}}\right)^{\frac{1}{3}} * 12000$$

$$= 257{,}83\frac{BTU}{ft^2hr°F} \tag{1.91}$$

A teljes hőátszármaztatási tényező:

$$U_c = \frac{h_c * h_{ci}}{h_c + h_{ci}} = \frac{3{,}645 * 257{,}83}{3{,}645 + 257{,}83} = 3{,}59\frac{BTU}{hrft^{2}°F} \tag{1.92}$$

1.4.6 Hőátadó felület

$$A_{konv} = \frac{Q_{konv-valódi}}{U_c * LMTD} = \frac{Q_{konv} - Q_{árny-veszt}}{U_c * LMTD} \tag{1.93}$$

$$= \frac{2{,}363 * 10^6\dfrac{BTU}{hr} - 0{,}815 * 10^6\dfrac{BTU}{hr}}{3{,}59\dfrac{BTU}{hrft^{2}°F} * 485{,}32°F} = 88{,}48ft^2 = 82{,}54m^2$$

Csövek száma a konvekciós zónában:

$$n_{konv-cső} = \frac{A_{konv}}{l_{látható} * A_{egységnyicső}} = \frac{888{,}49ft^2}{30{,}5ft * 0{,}622\dfrac{ft^2}{ft}} = 46{,}83 \tag{1.94}$$

$$n_{sor} = \frac{n_{konv-cső}}{n_{járat}} = \frac{46{,}83}{8} = 5{,}85{\sim}6db \tag{1.95}$$

$$n_{konv-cső-összes} = 6 * 8 = 48db \tag{1.96}$$

1.5 A csőkemence kéményének méretezése

Tegyük fel, hogy a levegő hőmérséklete 100 °F.

A füstgáz hőmérséklete 1400 °F.

6. Melléklet alapján a 100 ft-ra vonatkozó huzat a tűztérben 0,96 in víz/100 ft.

Az árnyékoló csövek 16 ft távolságra legyenek egymástól.

Így a statikus huzat:

$$16ft * \frac{0{,}96\frac{in}{100ft}15{,}36}{100in} = 0{,}1536in = 0{,}39\ cm \tag{1.97}$$

Tegyük fel, hogy az égőkben a nyomásesés 0,25 inch. Az árnyékoló csöveknél a huzatnak minimum 0,07 inchnek kell lennie. A füstgáz 1 ft^2-ra vonatkoztatott tömegárama: 0,0968 [lb/(ft^2s)].

A füstgáz sűrűsége:

$$\rho_{füstgáz} = 0{,}0227\frac{lb}{ft^3} \tag{1.98}$$

A sebességmagasság kiszámítása:

$$p_v = \left(\frac{v^2}{2*g}\right) * \left(\frac{\rho_g}{\rho_w}\right) * 12 = 0{,}003 * v^2 * \rho_g = 0{,}003\frac{G_{füstgáz}^2}{\rho_g} \tag{1.99}$$

$$p_v = 0{,}003 * \frac{0{,}0968^2\left(\frac{lb}{ft^2s}\right)^2}{0{,}0227\frac{lb}{ft^3}} = 0{,}00124in = 0{,}03\ mm \tag{1.100}$$

A súrlódási veszteség:

$$16 * \frac{0{,}00124}{2} = 0{,}00992in = 0{,}25\ mm \tag{1.101}$$

A kéményhuzatot 100°F-tel alacsonyabb hőmérsékleten veszem figyelembe:

$$1125°F - 100°F = 1025°F = 551{,}67°C \tag{1.102}$$

A füstgáz térfogatárama:

$$V_{füstgáz} = \frac{m_{füstgáz}}{\rho_{füstgáz}} = \frac{4{,}052\frac{lb}{s}}{0{,}025\frac{lb}{ft^3}} = 162{,}08\frac{ft^3}{s} = 4{,}59\frac{m^3}{s} \quad (1.103)$$

A kémény becsült átmérője legyen ($d_{kémény}$): 5ft=1,52 m

Így a kémény keresztmetszete:

$$A_{kémény} = \left(\frac{d_{kémény}}{2}\right)^2 * \pi = \left(\frac{5ft}{2}\right)^2 * \pi = 19{,}63ft^2 = 1{,}82m^2 \quad (1.104)$$

Az áramlási sebesség a kéményben:

$$v_{füstgáz} = \frac{V_{füstgáz}}{A_{kémény}} = \frac{162{,}08\frac{ft^3}{s}}{19{,}63ft^2} = 8{,}26\frac{ft}{s} = 2{,}52\frac{m}{s} \quad (1.105)$$

A sebességmagasság a kéményben:

$$p_v = 0{,}003 * \left(8{,}26\frac{ft}{s}\right)^2 * 0{,}025\frac{lb}{ft^3} = 0{,}00512in = 0{,}01\ cm \quad (1.106)$$

Legyen a kémény becsült magassága:

$$L = 80ft \rightarrow \frac{L}{666 * D} = \frac{80ft}{50 * 5ft} = 0{,}32 \quad (1.107)$$

Összes veszteség a kéményben:

$$(3 + 0{,}32) * 0{,}044 = 0{,}146in = 0{,}37\ cm \quad (1.108)$$

Szükséges statikus huzat:

$$0{,}07 + 0{,}0096 + 0{,}146 = 0{,}226in = 0{,}57cm \quad (1.109)$$

A 100 ft-ra vonatkoztatott huzat a kéménynél 1025°F-en 0,857in/100ft.(6. Melléklet)

A szükséges kéménymagasság:

$$L_{kémény} = \frac{0{,}226in}{0{,}857in} * 100ft = 26{,}37ft = 8{,}04m \tag{1.110}$$

1.6 Csőkemencék fontosabb méretei

A további 6 db csőkemence tervezése szintén az API 560-as szabvány alapján került megtervezésre, azonban a terjedelemre való tekintettel a részletes számítások nem képezik a dolgozat részét. 3-3 db egyforma kemencét kellett terveznem, ugyanis a nagy anyagáramra való tekintettel az 1-1 csőkemence helyett két helyen is 3 darab csőkemencét alkalmaztam. Ezeknek a főbb méreteit a következő táblázatok foglalják össze:

1.4. táblázat

F1, F2 és az F3-as csőkemence méretei		
Anyagáram	kg/h	35257,4
Fajhő	kJ/kg°C	4,759
Bemenő hőmérséklet	°C	150
Kilépő hőmérséklet	°C	550
Belépő nyomás	bar	20
Füstgáz hőmérséklet	°C	316,7
Teljes hőmennyiség	kJ/h	$6,7*10^6$
Teljes teljesítmény	MW	18,64
Szükséges hőmennyiség	kJ/h	$79,9*10^6$
Szükséges teljesítmény	MW	22,19
Füstgáz mennyisége	kg/s	9,3
Radiációs zóna		
Radiációval átadott hőmennyiség	kJ/h	$59,93*10^6$
Radiációs felület	m^2	447,69
Összes radiációs cső	db	56
Radiációs fluid zónahatár	°C	516
Egy cső felülete	m^2	8,26
Összes csőfelület	m^2	462,7
Fluidum átlagos hőmérséklete a radiációs zónában	°C	541,7
Konvekciós zóna		
Konvekciós zóna hőigénye	kJ/h	$17,58*10^6$
Teljes szélesség	m	2,59
Szabad keresztmetszet	m^2	19,61
Konvektív hőátadó felület	m^2	783,76
Összes konvekciós cső	db	96

Kémény		
Kémény kerezstmetszete	m^2	1,82
Kéménymagasság	m	16,9

1.5. táblázat

F5, F6 és az F7-es csőkemence méretei		
Anyagáram	kg/h	41752,4
Fajhő	kJ/kg°C	2,438
Bemenő hőmérséklet	°C	610
Kilépő hőmérséklet	°C	790
Belépő nyomás	bar	19,5
Füstgáz hőmérséklet	°C	701,66
Teljes hőmennyiség	kJ/h	$33,08*10^6$
Teljes teljesítmény	MW	9,189
Szükséges hőmennyiség	kJ/h	$53,36*10^6$
Szükséges teljesítmény	MW	14,82
Füstgáz mennyisége	kg/s	6,21
Radiációs zóna		
Radiációval átadott hőmennyiség	kJ/h	$37,36*10^6$
Radiációs felület	m^2	299,03
Összes radiációs cső	db	48
Radiációs fluid zónahatár	°C	806,8
Egy cső felülete	m^2	6,4
Összes csőfelület	m^2	307,38
Fluidum átlagos hőmérséklete a radiációs zónában	°C	841,19
Konvekciós zóna		
Konvekciós zóna hőigénye	kJ/h	$3,207*10^6$
Teljes szélesség	m	2,59
Szabad keresztmetszet	m^2	19,61
Konvektív hőátadó felület	m^2	165,95
Összes konvekciós cső	db	32

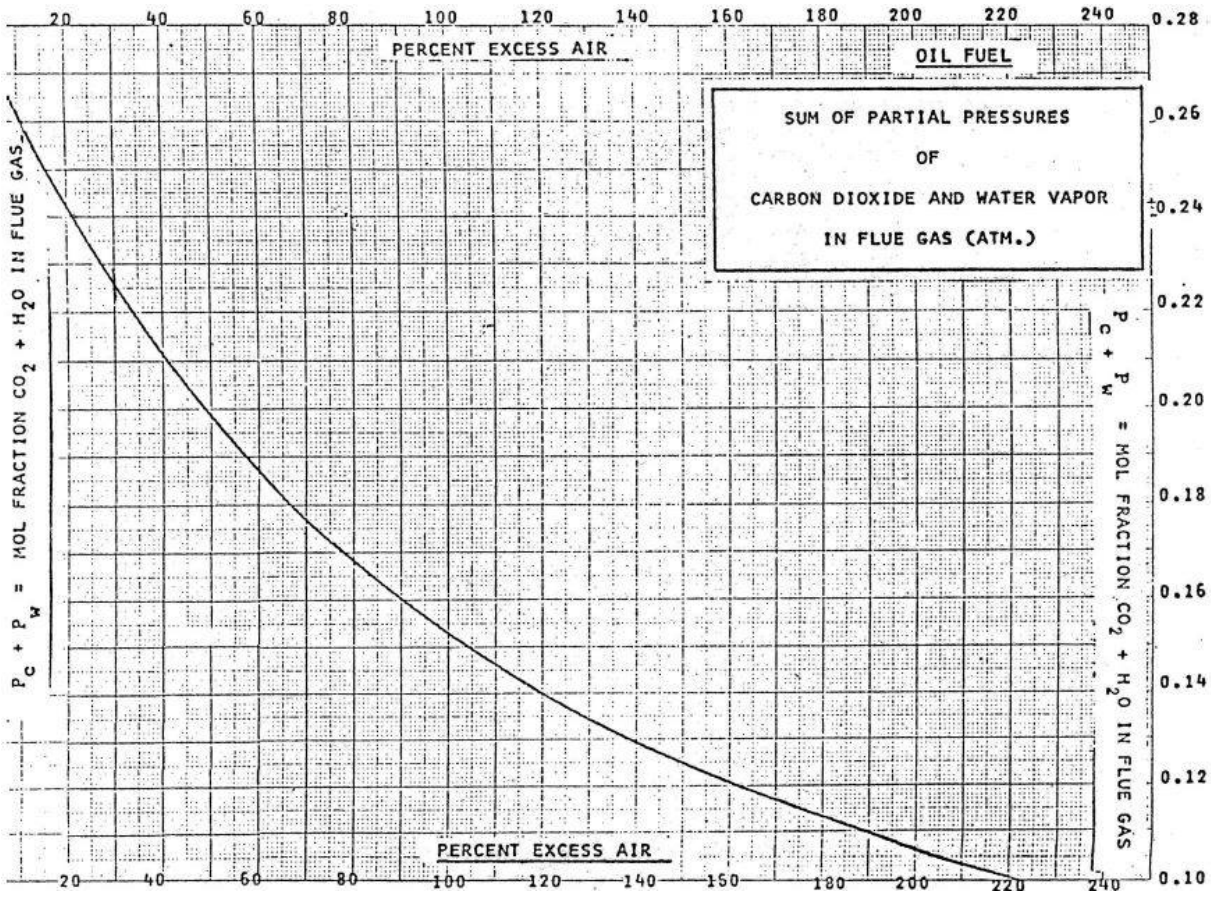
Kémény		
Kémény kerezstmetszete	m^2	1,82
Kéménymagasság	m	12,42

2. Melléklet

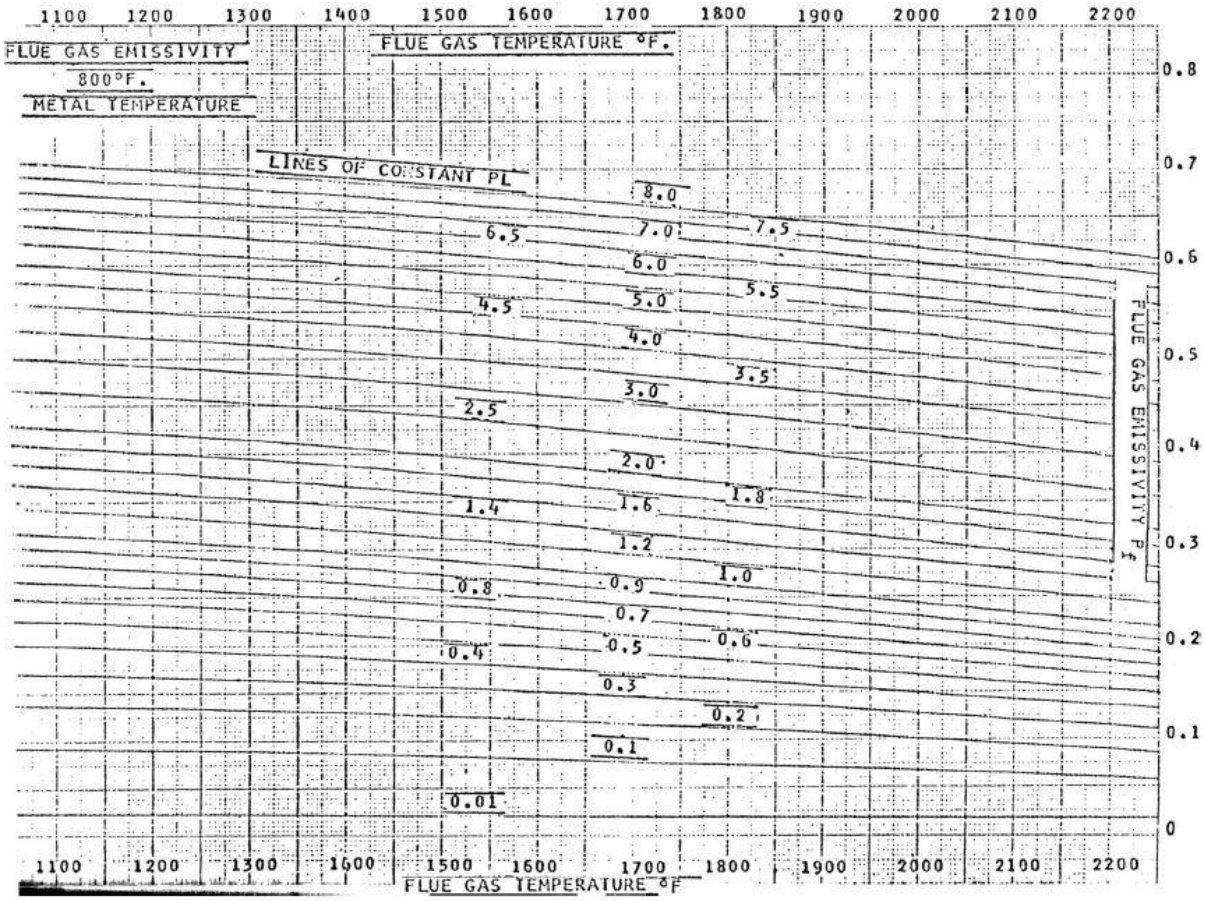
1. Melléklet

Dimensional Ratios (length, width, height in any order or diameter (d), feet)	Length of Beam, Feet
Rectangular Furnaces:	
1:1:1 to 1:1:3	2/3 $\sqrt[3]{\text{furnace volume}}$
1:2:1 to 1:2:4	2/3 $\sqrt[3]{\text{furnace volume}}$
1:1:4 to 1:1:∞	1.0 x (smallest dimension)
1:2:5 to 1:2:8	1.3 x (smallest dimension)
1:3:3 to 1:∞:∞	1.8 x (smallest dimension)
Cylindrical Furnaces:	
d x d	2/3 x (diameter)
d x 2d to d x ∞d	1.0 x (diameter)

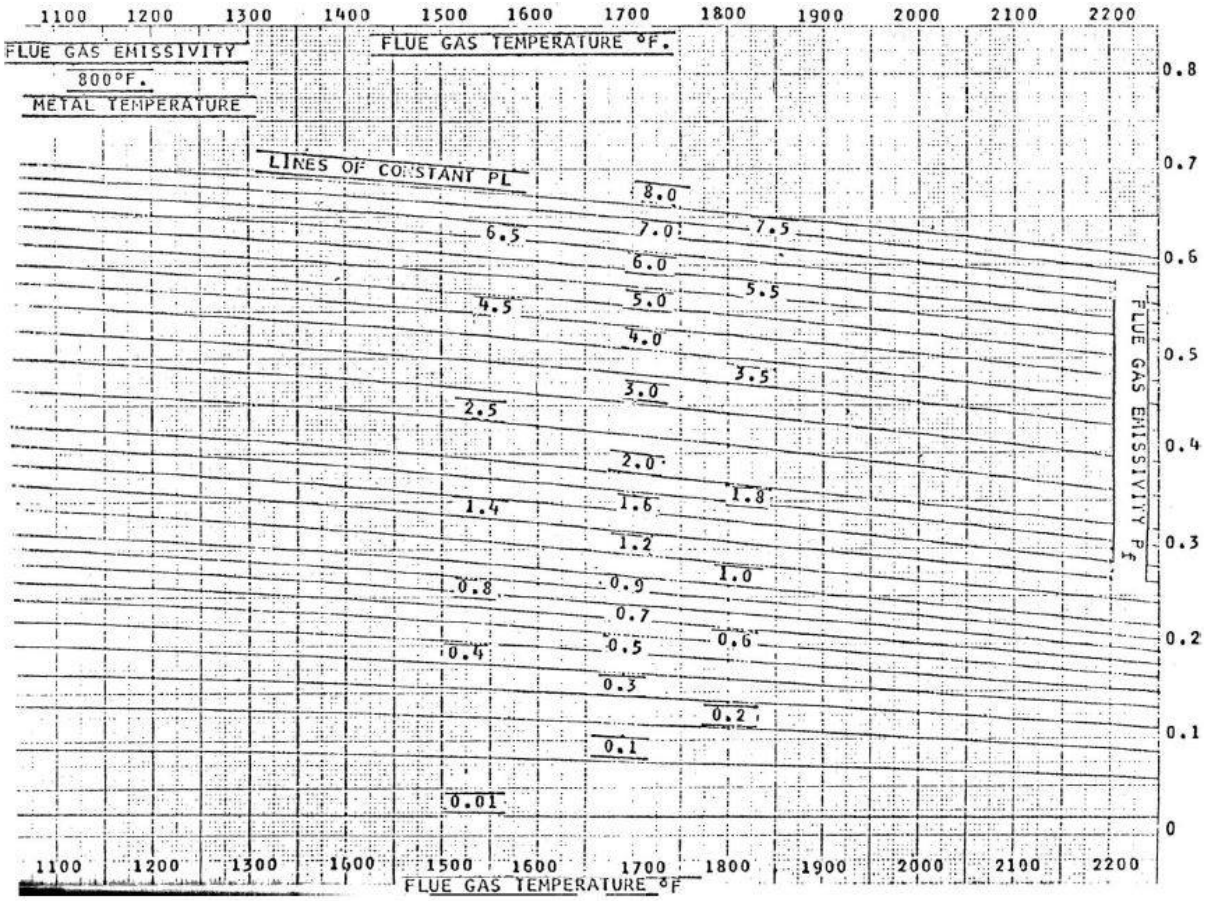
2. Melléklet


PERCENT EXCESS AIR
OIL FUEL
SUM OF PARTIAL PRESSURES
OF
CARBON DIOXIDE AND WATER VAPOR
IN FLUE GAS (ATM.)
$P_c + P_w$ = MOL FRACTION $CO_2 + H_2O$ IN FLUE GAS
$P_c + P_w$ = MOL FRACTION $CO_2 + H_2O$ IN FLUE GAS
PERCENT EXCESS AIR
20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240
0.28 0.26 0.24 0.22 0.20 0.18 0.16 0.14 0.12 0.10

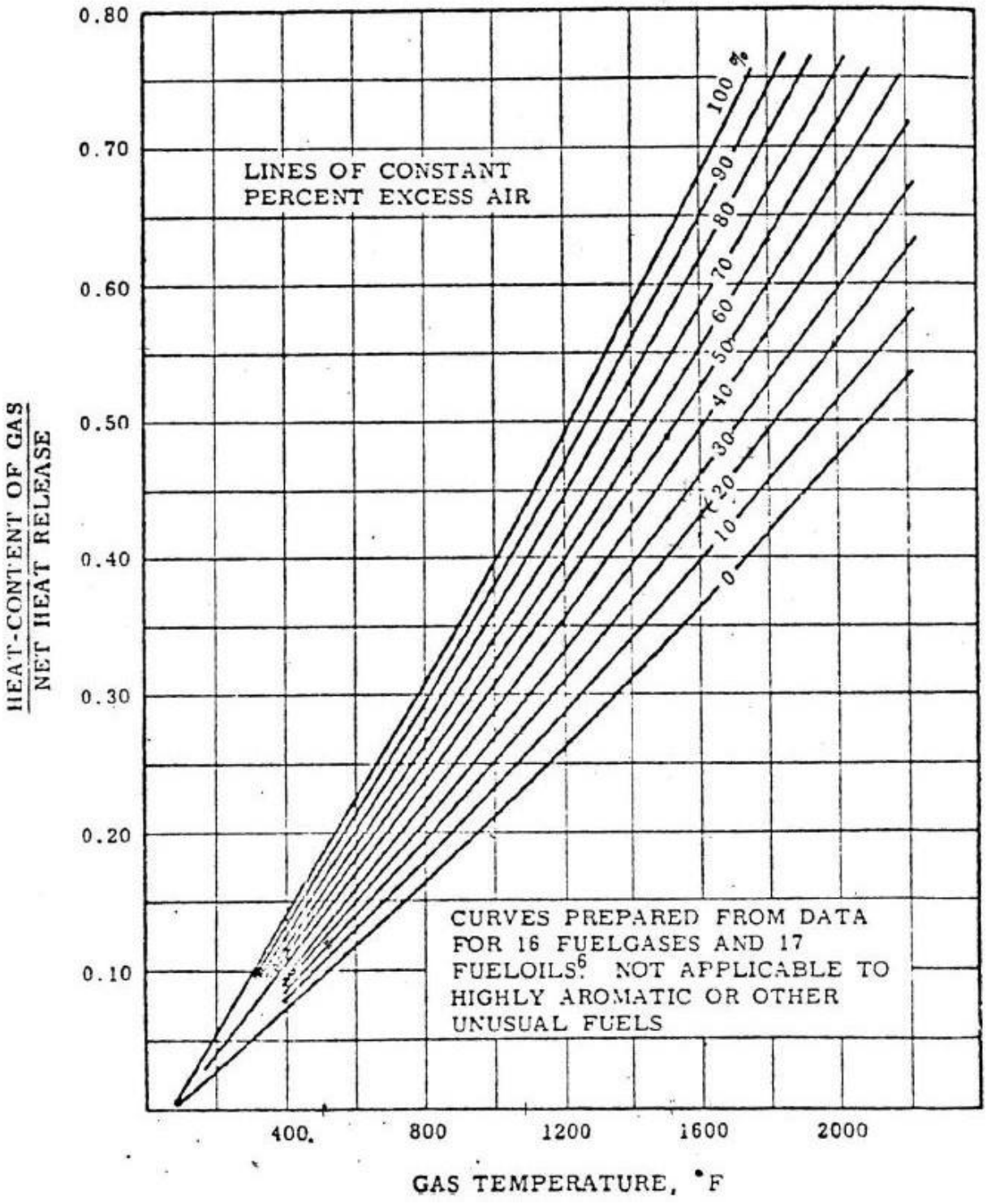
3. Melléklet


FLUE GAS EMISSIVITY
800°F.
METAL TEMPERATURE
FLUE GAS TEMPERATURE °F.
LINES OF CONSTANT PL
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.01
1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200
FLUE GAS TEMPERATURE °F
FLUE GAS EMISSIVITY Pf
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

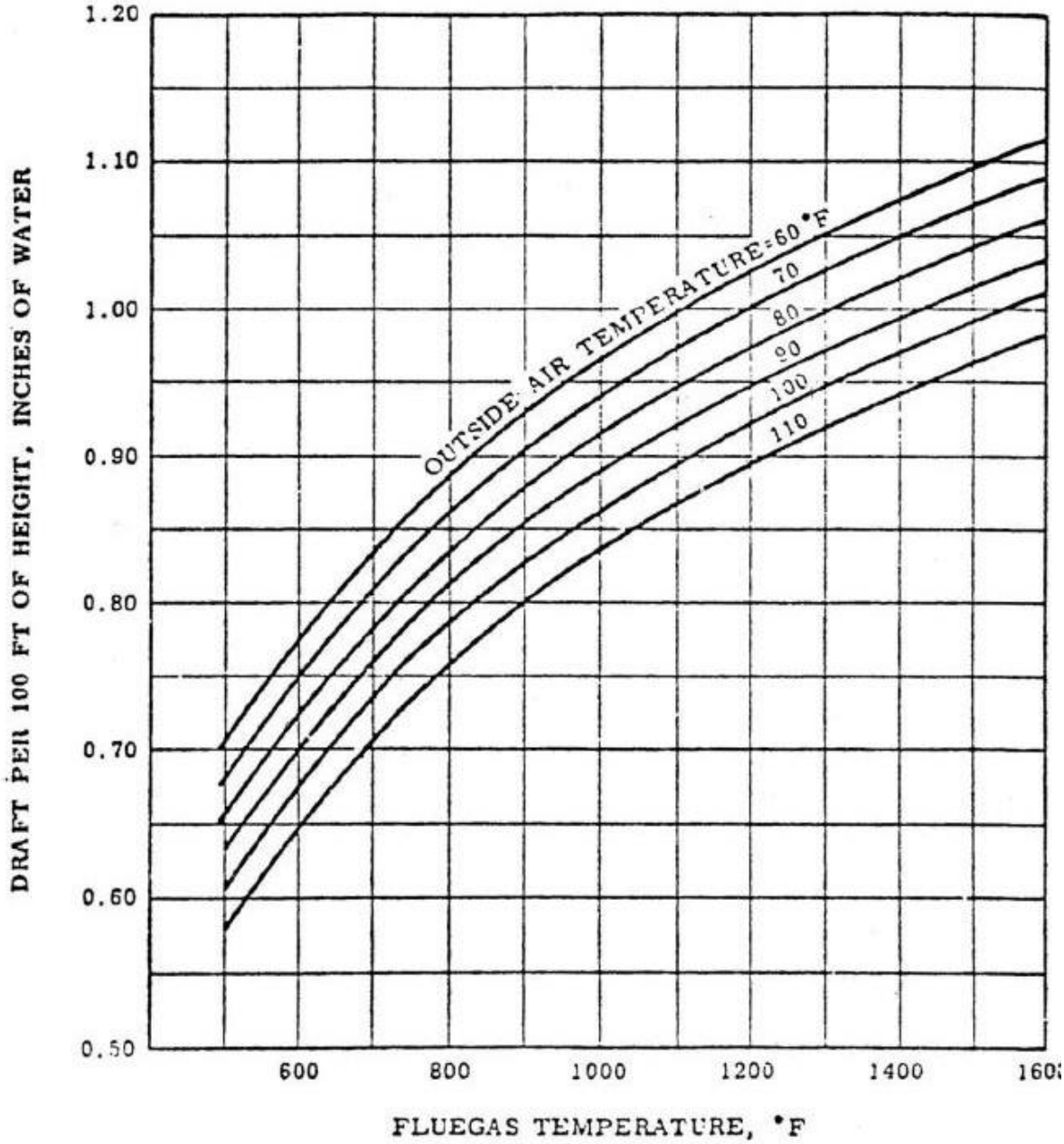
4. Melléklet


FLUE GAS EMISSIVITY
800°F.
METAL TEMPERATURE
FLUE GAS TEMPERATURE °F.
LINES OF CONSTANT PL
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.01
1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200
FLUE GAS TEMPERATURE °F
FLUE GAS EMISSIVITY Pf
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

5. Melléklet


0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
LINES OF CONSTANT
PERCENT EXCESS AIR
100 %
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
CURVES PREPARED FROM DATA
FOR 16 FUELGASES AND 17
FUELOILS.[6] NOT APPLICABLE TO
HIGHLY AROMATIC OR OTHER
UNUSUAL FUELS
400.
800
1200
1600
2000
GAS TEMPERATURE, °F
HEAT-CONTENT OF GAS
NET HEAT RELEASE

6. Melléklet


DRAFT PER 100 FT OF HEIGHT, INCHES OF WATER
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
OUTSIDE AIR TEMPERATURE = 60 °F
70
80
90
100
110
600
800
1000
1200
1400
FLUEGAS TEMPERATURE, °F

3. Irodalom

[1] American Petroleum Institute: *Fired Heaters for General Refinery Services.* 2001.