

## Kavarós filmbepárló vizsgálata

### 1. Elméleti összefoglalás

(Lásd még az “Elméleti bevezetés a hőtani mérésekhez” és a “Bepárlás vizsgálata” című fejezeteket)

A kavarós filmbepárlók szerkezetileg az esőfilmes bepárlókból alakultak ki. Ezek egyszeri átfolyású készülékek, amelyekben – a nagy folyadékterű bepárlóktól eltérően – a bepárlandó anyag rövid ideig tartózkodik, hőmérséklete, koncentrációja, viszkozitása (és így a folyadékoldali hőátadási tényező) folytonosan változik (és nem a végső, elvételi állapotnak megfelelő érték).

A folyadékoldalon igen jó (átlagos) hőátadási tényező,  $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$  körüli érték is elérhető, ezt azonban a hőátbocsátási tényezőben rendszerint nem lehet kihasználni, mert a kavarós filmbepárlóknak a belső felületét finoman kell megmunkálni (esztergálás, polírozás), ezért vastag a fűtőfal és viszonylag nagy az ellenállása.

A kavarós filmbepárlók fő alkalmazási területe:

- hőérzékeny anyagok bepárlása (kis tartózkodási idő!),
- nagy viszkozitású anyagok bepárlása (a folyadékfilmben megfelelő áramlást biztosítanak a lapátok).

Hőmérsékletviszonyok a filmbepárlóban:

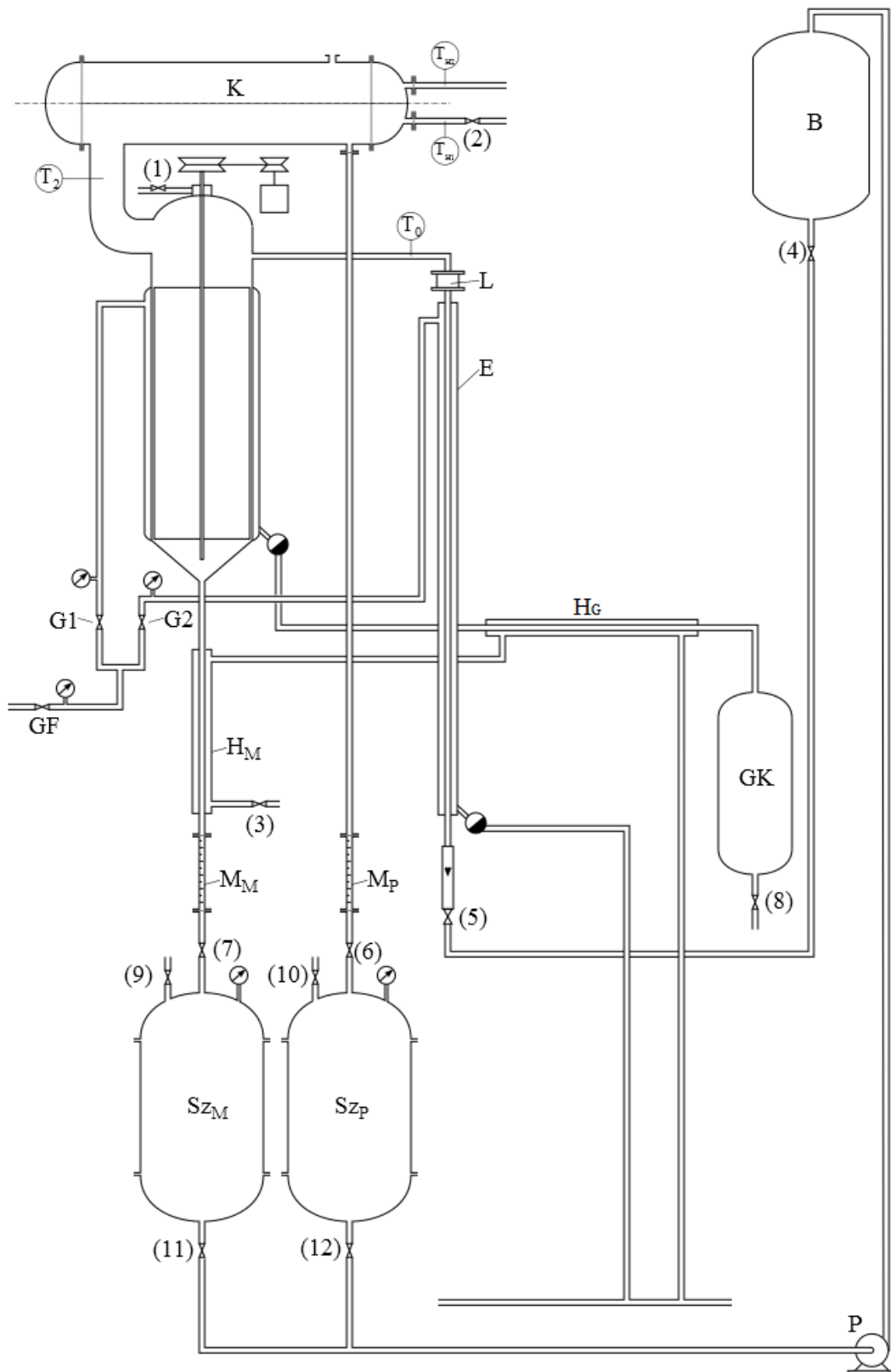
- forrásponti betáplálás esetén a forralt folyadék hőmérséklete a bepárlóban mindenütt forrásponti (a forráspont koncentrációfüggése miatt a hőmérséklet axiális irányban változó lehet);
- forráspontnál kevéssel hidegebb táplálékot a fűtőgőz a fűtőfalon keresztül, de főleg a fel szálló pára belülről gyorsan forráspontra melegíti, a folyadék hőmérséklete tehát gyakorlatilag itt is forrásponti;
- hideg betáplálás esetén a hőmérséklet-lefutás eltolódik az egyáramú hőcserélő exponenciális hőfoklefutása irányába (a bepárló egy része dolgozik csak bepárlóként!).

A filmbepárló túl drága készülék ahhoz, hogy fűtőfelülete egy részét előmelegítőként használjuk. Ezért előmelegítőt (pl. csököteges hőcserélőt) célszerű a készülék elé iktatni - kivéve, ha nagy vákuumban, alacsony forrásponton dolgozunk.

A lengőlapátos filmbepárlóban az oldatot közel kristályosodásig is lehet párolni, a lengőlapátok lekaparják a száraz réteget, de ekkor előfordulhat, hogy a felület egy része kiszárad, s ezért leromlik a hőátadás. Ettől az esettől eltekintve a lengőlapátok közel állandó, a betáplálás sebességétől független filmvastagságot biztosítanak (az anyag feleslege az ún. orrhullámban van, amit a lapátok maguk előtt tolnak).

### 2. A berendezés leírása

A berendezés folyamatábrája a 1. ábrán látható. Csak a mérés szempontjából legfontosabb elemeket tüntettük fel. A készülék részletes kialakítását nézzék át a mérés megkezdése előtt!



1. ábra A lengőlapátos filmbepárló mérés folyamatábrája

### Jelölések magyarázata:

- (1) Lengőlapátok tengelyének csapágát hűtő víz szabályozó csapja
- (2) Kondenzátor hűtővizének szabályozó csapja
- (3) A maradékot és a fűtőgőz-kondenzátumot hűtő víz szabályozó szelepe
- (4) Betáp térfogatáramát beállító szelep
- (5) Rotaméter előtti záró szelep
- (6) Páraszedő feltöltő csap
- (7) Maradékszedő feltöltő csap
- (8) Fűtőgőz-kondenzátum leeresztő csap
- (9) Maradékszedő levegőztető csap
- (10) Páraszedő levegőztető csap
- (11) Maradékszedő leeresztő csap
- (12) Páraszedő leeresztő csap

GF	Fűtőgőz főcsap
G1	Bepárlót fűtő gőz szabályozó szelepe
G2	Előmelegítőt fűtő gőz szabályozó szelepe
B	Táptartály
E	Előmelegítő
L	Látszakasz
H <sub>M</sub>	Maradék (bepárolt anyag) hűtője
M <sub>M</sub>	Maradék mennyiségét mérő mérőhenger
H <sub>G</sub>	Bepárló fűtőgőz-kondenzátumának hűtője
GK	Fűtőgőz-kondenzátum szedőtartálya
K	Csőköteges kondenzátor
M <sub>P</sub>	Parakondenzátum (kondenzált oldószer) mennyiségét mérő mérőhenger
SZ <sub>M</sub>	Maradékszedő
SZ <sub>P</sub>	Páraszedő
P	Szivattyú

T <sub>0</sub>	A bepárlóba belépő folyadék hőmérsékletét mérő műszer
T <sub>2</sub>	A bepárlóból távozó pára hőmérsékletét mérő műszer
T <sub>H1</sub>	A kondenzátorba bemenő hűtővíz hőmérsékletét mérő műszer
T <sub>H2</sub>	A kondenzátorból távozó hűtővíz hőmérsékletét mérő műszer

A bepárlandó folyadék a **B** táptartályból a nehézségi erő hatására folyik le a bepárlóba. A táplálás mennyiségét ( $S_0$ ) a megfelelő méréshatárú rotaméterrel mérjük, és a **(4)** jelű csappal állandó értékre állítjuk be.

Az **E** előmelegítő gőzzel fűthető. Az előmelegítő hossza 80 cm, a belső cső 21,8 mm külső átmérőjű, falvastagsága 2 mm. Az előmelegítőben a fűtőgőz nyomását a **(G2)** jelű szeleppel kell beállítani, viszonylag alacsony, 0,4-0,8 bar túlnyomás értékre. Az **L** látszakaszban ellenőrizni tudjuk, hogy a táplálás nem melegedett-e túl (gőzbuborék ne legyen benne, a bepárlóban forralunk csak). Akkor megfelelő a fűtés beállítása, ha az filmbepárlóba belépő oldat hőmérséklete 92-96 °C (még nem forr). A betáplálás hőmérséklete mérhető az előmelegítő után ( $T_0$ ), az előmelegítő előtt szobahőmérsékletű ( $T_B$ ).

A besűrített oldat az **Sz<sub>M</sub>** szedőben gyűlik össze a **H<sub>M</sub>** hűtőn való áthaladás után. A sűrített oldat térfogatáramát az **M<sub>M</sub>** mérőhengerben köbözéssel mérjük. A filmbepárlóból kilépő pára hőmérsékletét ( $T_2$ ) mérjük mielőtt a páraáram a **K** kondenzátorban kondenzál. A **K** kondenzátor felülete: 1 m<sup>2</sup>, csőköteges, mind a hűtővízre, mind a gőzre kétjáratú. A pára a (vízszintes terelőlappal két részre osztott) csövek közti térben kondenzál.

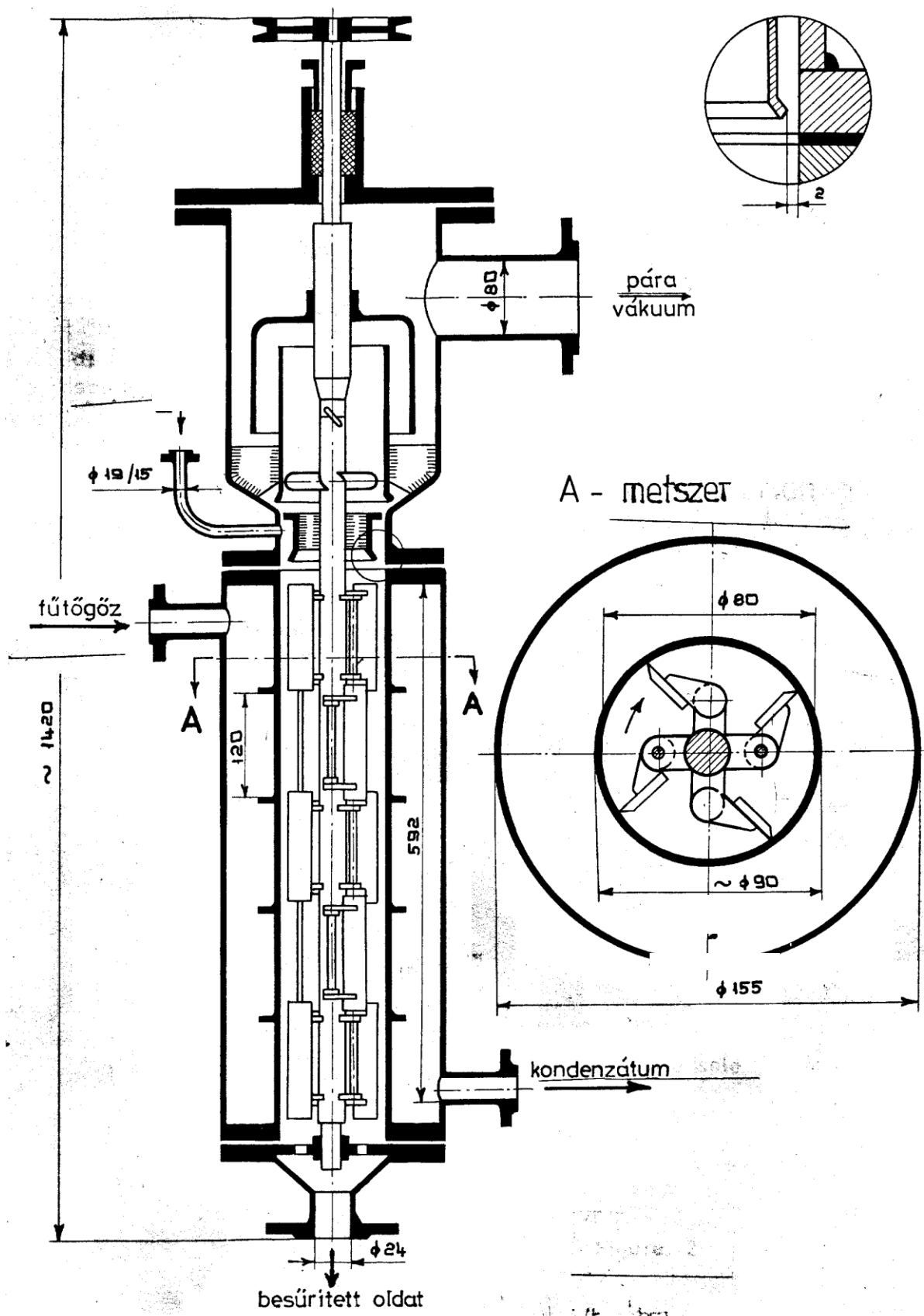
A párakondenzátum térfogatáramát az **M<sub>P</sub>** mérőhengerrel határozhatjuk meg. A párakondenzátum az **Sz<sub>P</sub>** szedőben gyűlik össze. A szedőkben összegyűjtött folyadékot a megfelelő csapok nyitása után (mindig ellenőrizzék a csapok állását!) a **P** jelű szivattyúval lehet visszajuttatni a táptartályba.

A bepárlótesben lekondenzált gőzt a **GK** tartályban gyűjtjük, mennyiségét tömegméréssel (időegység alatt keletkezett fűtőgőz-kondenzátum tömeg meghatározásával) határozzuk meg. (8.3.1 ábra)

A berendezés anyaggal érintkező részei saválló acélból készültek.

A filmbepárló belső fűtőfelülete: 0,15 m<sup>2</sup>, falvastagsága: 5 mm, a fal hővezetési tényezője: 14,5 W/mK. A kavaró fordulatszám: 7,6 ill. 9,1 s<sup>-1</sup>, az ékszij helyzetétől függően. A lapátok bélése teflon. A fűtőoldalon 4 kondenzátum-elterelő gyűrű van. (2. ábra)

A bepárló atmoszferikus működtetésre alkalmas. A mérés megkezdése előtt ellenőrizni kell, hogy a táptartály és a szedőtartályok levegőztető nyílásai nyitva vannak-e (a tartályok tetején levő csapok nyitott állásúak). A kondenzátor felső részén nem elzárható levegőzőcsomk található (a berendezés atmoszférikus nyomáson működik).



2. ábra Lengőlapátos filmbepárló

A berendezés atmoszférikus nyomáson üzemeltethető.

### Mérési helyek

Hőmérsékletmérés: Pt ellenállás hőmérőkkel, leolvasás a műszerfalán mérőhely átkapcsoló segítségével. A kapcsoló 4 mérési lehetőséget biztosít, ezek a következők:

1. mérőhely: betáplálás előmelegítők utáni hőmérséklete ( $T_0$ )
2. mérőhely: hűtővíz kilépő hőmérséklete ( $T_{H2}$ )
3. mérőhely: pára hőmérséklete ( $T_P$ )
4. mérőhely: hűtővíz belépő hőmérséklete ( $T_{H1}$ )

A fűtőgőz (fűtőgőz kondenzátum) hőmérsékletét a nyomása alapján vízgőztáblázatból keressük ki ( $T_{G1}$ ,  $T_{G2}$ ).

A betáplálás előmelegítők előtti hőmérsékletét ( $T_B$ ) a labor hőmérsékletével tekintjük egyenlőnek.

Mennyiségmérés: a betáplálás mennyiségét 15-100 dm<sup>3</sup>/h (fém úszó) ill. 4...40 dm<sup>3</sup>/h (műanyag úszó) méréshatárú rotaméter úszókkal mérjük. A rotaméter úszók 20 °C-os vízre vannak kalibrálva. A műanyag úszó rotaméter kalibrációs összefüggése:

$$\dot{V} [\text{dm}^3/\text{h}] = -2,9 + 0,45 \cdot \text{skr}$$

a fémúszó skálabeosztása közvetlenül dm<sup>3</sup>/h-t jelent.

A párlat kondenzátumának mennyiségét az  $M_P$  1000 ml-es, 250 ml-enként kalibrált mérőhengerben mérjük. A mérőhenger alatti csapot elzárjuk és mérjük pl. 250 ml párlat lefolyásához szükséges időt stopperórával.

A maradék mennyiségét az  $M_M$  mérőhengerben mérjük hasonló módon, a két osztás közötti rész 40 ml.

A fűtőgőz-kondenzátum mennyiségét műanyag edényben mérjük, tömegvisszaméréssel.

Nyomásmérés: csőrugós manométerrel mérjük a fűtőgőz nyomását a **GR** stabilizált nyomáscsökkentő szelep (gőzreduktor) után ( $p_0$ ), az **E** előmelegítő köpenyterében ( $p_{G1}$ ) és a bepárló fűtővezetékében ( $p_{G2}$ ). A légnomást a laboratóriumban elhelyezett barométerrel olvassuk le.

### **3. Mérési feladat**

A mérés célja a filmbepárló kapacitásának (azaz az átadott hőáramnak), a bepárló hőveszteségének ill. a hőátbocsátási és hőátadási tényezőknek megállapítása.

#### Útmutatás a készülék kezeléséhez

A mérésvezető adja meg: a fűtőgőz nyomását és a betáplálás sebességét. A mérés megkezdése előtt a folyamatábra alapján végigjárjuk a készüléket. Ellenőrizzük, hogy minden tartály levegőre nyitott legyen! Keressék meg, hogy a kondenzátornál hol nyitott a levegőre a bepárló!

#### Indítás

1. Kinyitjuk a T táptartály alatti **(4)** szelepet, majd a **(5)** csappal beállítjuk a rotamétert a kívánt jelre. (10-25 dm<sup>3</sup>/h)
2. Megindítjuk a filmbepárló kavartengely csapágyának hűtővizét **(1)**.
3. Megindítjuk a **K** kondenzátor és a **H<sub>M</sub>** valamint a **H<sub>G</sub>** hűtők hűtővizét **((2) és (3) csapok)**. A két hűtő sorba van kötve. A csapokat kb. harmad-félállásig kell nyitni.
4. Bekapcsoljuk a motort.
5. A reduktor előtti gőzszelep **(GF) lassú** nyitásával nyomás alá helyezzük a gőzdómot (a folyamatábrán nincs jelölve).

5. Megkezdjük a bepárló fűtését: a fűtőgőznyomást a megadott értékre állítjuk be a **G1** gőzszeleppel.
6. Az **E** előmelegítő fűtését beszüntítjük a **G2** gőzszeleppel, hogy a  $T_0$  a kívánt érték legyen (kb 92-96 °C). Az **L** látszakaszban ne legyenek gőzbuborékok!

A beállított értékek és a táptartály folyadékszintje rendszeres, folyamatos ellenőrzést igényel. A műszereket legalább 5 percenként olvassuk le és rögzítsük egy adattáblázatban. A számoláshoz a stacionárius állapot elérése után 3-5 egymás utáni mérés eredményét kell felhasználni.

Stacionárius állapot: A stacionárius állapot beállt, ha a hőmérsékletek állandók, ill. ha a mérőhengekben 3 egymás után mért párlat és maradék áram nem mutat egyirányú járást és az eltérés közöttük kisebb, mint 5 % (legalább 3 adatunk legyen a párlatmennyiség számításához), a gőzkondenzátum mennyisége 10%-on belüli szórást mutat.

Leállítás:

1. Zárjuk a reduktor előtti gőzszelepet.
2. Zárjuk az előmelegítő és a bepárló fűtését.
3. Kikapcsoljuk a keverést, elzárjuk a csapágyhűtést.
4. Amikor már nem keletkezik több párakondenzátum, elzárjuk a kondenzátor és maradék hűtését.
5. Leállítjuk a betáplálást a csap zárásával (a táptartály alatti szelepet is zárjuk el!).

#### 4. A mérés kiértékelése

1. A stacionárius állapotban mért adatok számtani átlagával számolunk.
2. Ellenőrizzük a bepárló anyagmérlegét, értékeljük az eltérést

$$S_0 = S_1 + V, \text{ ahol}$$

$S_0$  a betáplálás tömegárama (kg/s)

$S_1$  a maradék tömegárama (kg/s)

$V$  a pára tömegárama (kg/s)

3. Mivel a bepárlót tiszta vízzel üzemeltetjük, a  $T_1=T_p$  forrásponti hőmérséklet a barométer nyomáshoz, a fűtőgőz hőmérséklet a fűtőgőznyomáshoz tartozó telített érték. Ezeket vízgőztáblázatból vesszük.
4. A bepárlóban átadott hőmennyiséget ( $\dot{Q}_{hasznos}$ ) és a hővesztéseket ( $\dot{Q}_{veszt}$ ) az alábbi egyenletből számítjuk. A számításhoz szükséges entalpia és fajhő adatokat a vonatkozó hőmérséklet alapján vízgőztáblázatból vesszük.

$$\dot{Q}_{hasznos} = S_1 \cdot i_1 + V \cdot i''_V - S_0 \cdot i_0 = G_1 \cdot r_1 - \dot{Q}_{veszt}, \text{ ahol}$$

$i_1$  a maradék entalpiája forrásponti hőmérsékleten (kJ/kg)

$i''_V$  a pára entalpiája harmatponti hőmérsékleten (kJ/kg)

$i_0$  a betáplálás entalpiája forrásponti hőmérsékleten (kJ/kg)

$G_1$  a bepárlóban felhasznált fűtőgőz tömegárama (kg/s)

$r_1$  a bepárló fűtőterében kondenzálódó gőz párolgáshője (kJ/kg)

Értékelje a hőveszteség értékét. A gőzfelhasználás hány százaléka fordítódik a hőveszteség fedezésére?

5. Számítsa ki a hőátbocsátási tényezőt a bepárló belső felületére. A bepárlóban az átlagos hőmérsékletkülönbség, ha a betáplálás közel forrásponti hőmérsékleten történt és volt pára képződés, a fűtőgőz ill. a páratér nyomásához tartozó telítési hőmérsékletek különbsége.
6. Számítsa ki a Nusselt egyenletből a gőzoldali hőátadási tényezőt:

$$\alpha_G = 1,88 \lambda \left( Re_L \frac{\eta^2}{\rho^2 g} \right)^{-1/3}$$

ahol

$$G_h = \frac{\dot{Q}_{teljes} - \dot{Q}_{veszt}}{r_1} \quad \text{A hasznos fűtőgőz-kondenzátum tömegárama (kg/s)}$$

$$Re_L = \frac{4 G_h}{5 z \eta} \quad \text{lecsorgó kondenzfilm Reynolds száma (mert a köpenyben 4 kondenzvíz-elterelő gyűrű van)}$$

$$z = D\pi \quad \text{bepárlócső azon kerülete, ahol a kondenzvíz lecsorog (m) (A 2. ábráról kell leolvasni)}$$

$$\dot{Q}_{teljes} - \dot{Q}_{veszt} = \dot{Q}_{hasznos} \quad \text{a fűtőfelületen átadott hasznos hőáram (W)}$$

**Figyelem!** a Nusselt egyenletben szereplő anyagi állandók ( $\eta$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ) mind a gőzkondenzátumra vonatkoznak (azaz vízre) a kondenzátum átlaghőmérsékletén. Ez utóbbi nem ismert, de jó közelítéssel a kondenzálás hőmérsékletével helyettesíthető. Az értékeket vízgőztáblázatból vesszük.

7. Számítsák ki a folyadékoldali hőátadási tényezőt a filmbepárlóban!
8. Számítsák ki az egyes hőtani ellenállások értékét a filmbepárlóban (gőzoldal, fal, folyadékoldal).
9. Számítsák ki a fűtőgőzfelhasználást az előmelegítőben (a hőveszteség elhanyagolható) és a hőátbocsátási tényező értékét. A betáplálásra vonatkozó anyagi jellemzőket az átlaghőmérsékleten vegyék figyelembe.
10. Az eredményeiket foglalják össze eredménytáblázatban és értékeljék szövegesen.

### Beadandó

1. Az adattábla a mérési adatokkal
2. A részletes számolás
3. Az eredménytáblázat és értékelés.

A leíratot a tanszéki munkaközösség korábbi munkája alapján készítette: Székely Edit





Nyomás $p$ (bar) abszolút	Hőmérséklet $T$ (°C)	Forrpointi folyadék				Harmatpointi gőz				Párolgáshő $r$ (kJ/kg)
		Sűrűség $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpia $i'$ (kJ/kg)	Viszkozitás $\eta$ (Pa·s)	Hővezetés $\lambda$ (W/m·K)	Sűrűség $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpia $i''$ (kJ/kg)	Viszkozitás $\eta$ (Pa·s)	Hővezetés $\lambda$ (W/m·K)	
0,50	81,3	970,94	340,54	3,486E-04	0,6708	0,3086	2645,20	1,164E-05	0,0231	2304,66
0,55	83,7	969,42	350,59	3,385E-04	0,6721	0,3374	2649,20	1,172E-05	0,0234	2298,61
0,60	85,9	967,99	359,91	3,297E-04	0,6733	0,3661	2652,90	1,179E-05	0,0236	2292,99
0,65	88,0	966,63	368,60	3,218E-04	0,6743	0,3945	2656,30	1,186E-05	0,0238	2287,70
0,70	89,9	965,34	376,75	3,147E-04	0,6752	0,4229	2659,40	1,193E-05	0,0240	2282,65
0,75	91,8	964,11	384,44	3,082E-04	0,6760	0,4511	2662,40	1,199E-05	0,0242	2277,96
0,80	93,5	962,93	391,71	3,023E-04	0,6767	0,4791	2665,20	1,205E-05	0,0244	2273,49
0,85	95,1	961,79	398,62	2,969E-04	0,6774	0,5071	2667,80	1,210E-05	0,0246	2269,18
0,90	96,7	960,70	405,20	2,919E-04	0,6780	0,5349	2670,30	1,216E-05	0,0247	2265,10
0,95	98,2	959,65	411,48	2,872E-04	0,6785	0,5627	2672,70	1,221E-05	0,0249	2261,22
1,00	99,6	958,63	417,50	2,829E-04	0,6790	0,5903	2674,90	1,226E-05	0,0251	2257,40
1,05	101,0	957,65	423,28	2,789E-04	0,6794	0,6179	2677,10	1,230E-05	0,0252	2253,82
1,10	102,3	956,69	428,84	2,751E-04	0,6798	0,6454	2679,20	1,235E-05	0,0254	2250,36
1,15	103,6	955,77	434,19	2,715E-04	0,6802	0,6728	2681,20	1,239E-05	0,0255	2247,01
1,20	104,8	954,86	439,36	2,682E-04	0,6805	0,7001	2683,10	1,243E-05	0,0256	2243,74
1,25	106,0	953,99	444,35	2,650E-04	0,6808	0,7274	2684,90	1,247E-05	0,0258	2240,55
1,30	107,1	953,13	449,19	2,620E-04	0,6811	0,7545	2686,60	1,251E-05	0,0259	2237,41
1,35	108,2	952,30	453,87	2,592E-04	0,6813	0,7816	2688,30	1,255E-05	0,0260	2234,43
1,40	109,3	951,49	458,42	2,565E-04	0,6815	0,8087	2690,00	1,259E-05	0,0262	2231,58
1,45	110,3	950,69	462,83	2,539E-04	0,6818	0,8357	2691,60	1,262E-05	0,0263	2228,77
1,50	111,4	949,92	467,13	2,514E-04	0,6820	0,8626	2693,10	1,266E-05	0,0264	2225,97
1,55	112,3	949,16	471,31	2,491E-04	0,6821	0,8895	2694,60	1,269E-05	0,0265	2223,29
1,60	113,3	948,41	475,38	2,468E-04	0,6823	0,9163	2696,00	1,273E-05	0,0266	2220,62
1,65	114,2	947,68	479,35	2,446E-04	0,6825	0,9431	2697,40	1,276E-05	0,0268	2218,05
1,70	115,2	946,97	483,22	2,426E-04	0,6826	0,9698	2698,80	1,279E-05	0,0269	2215,58
1,75	116,0	946,26	487,00	2,406E-04	0,6827	0,9964	2700,10	1,282E-05	0,0270	2213,10
1,80	116,9	945,57	490,70	2,386E-04	0,6828	1,0230	2701,40	1,285E-05	0,0271	2210,70
1,85	117,8	944,90	494,31	2,368E-04	0,6829	1,0496	2702,70	1,288E-05	0,0272	2208,39
1,90	118,6	944,23	497,85	2,350E-04	0,6830	1,0761	2703,90	1,291E-05	0,0273	2206,05