

Szivattyú kavitációs vizsgálata

1. Bevezetés

Folyadékot szállító csővezeték rendszerekben számos helyen felléphet a kavitáció jelensége, mely során a helyi nyomás a folyadék telített gőznyomásáig csökken, ekkor gőz képződik. Csővezeték rendszerek esetén, jellemzően szivattyúknál, elzáró- és szabályozó szerelvényeknél fordul elő kavitáció, mely több szempontból is káros lehet. Egyrészt zaj- és rezgés hatásokkal a környezetet terheli, így rontva a komfortérzetet, másrészt fizikai roncsolást okoz a berendezésben. A mai modern könnyűszerkezetes épületekben a rezgések nagyon könnyen szétterjedhetnek és más gépet, berendezést is károsíthatnak. A kavitáció során keletkezett káros rezgések magát a kibocsátó gépet is roncsolják, üzemét negatívan befolyásolják. Kavitáció szempontjából igen kritikusak egy rendszerben a szivattyúk, amelyek szívó oldalán figyelhető meg a roncsolódás.

2. A kavitáció kialakulása

Ha a szállított folyadékban (ez leggyakrabban víz) az áramlás folyamán az abszolút nyomás a helyi telített gőznyomás alá csökken (szivattyú esetében tipikusan a járókerékbe belépéskor), a folyadék homogenitása megszűnik, és a fal mikro repedéseiben, apró lebegő szemcsék felületén gőz tartalmú buborékok keletkeznek, azaz a folyadék helyileg forrni kezd. Ezt a jelenséget nevezik kavitációnak, ami a szivattyúk jó működésének fizikai határa. A kavitáció jelentős rezgés és zaj forrása lehet, sőt az áramlástechnikai jellemzők is megváltozhatnak, a jelenség fokozódása során a berendezés károsodása sem kerülhető el.



1. ábra. Szivattyú járókerékén kavitáció okozta erózió

Fizikai kavitációról akkor beszélünk, ha a megjelenő buborékok egyedinek, különállóknak tekinthetők. Az áramlást határoló falak mikro repedéseit, a folyadékban lévő szilárd szemcséket, vagy folyadékból kivált gázbuborékokat kavitációs magoknak nevezzük. A gyakorlatban használt szivattyús rendszereknél mindig megtalálhatók nagy számban a kavitációs magok. A berendezések áramlástechnikai paramétereiben a keletkező néhány tíz-, vagy százmikronos nagyságú gőzbuborékok nem okoznak változást.

Amennyiben a buborékok egyesülnek, és összefüggő, jól megfigyelhető zónát alkotnak, akkor a jelenséget technikai kavitációnak nevezik. A kavitációs zóna az áramlást határoló szilárd felületen képződik, majd onnan leválik, de a falon újra képződik. A szivattyú hidraulikai jellemzőiben (szállítómagasság, térfogatáram, stb.) a technikai kavitáció megjelenése már komoly megváltozást idéz elő.

A szuperkavitációs állapot akkor következik be, amikor a technikai kavitáció során tovább csökken az áramlási tér nyomása. Ekkor már nemcsak egy-egy pontban keletkeznek gőzbuborékok, hanem nagyobb, összefüggő tartományban.

A fizikai, vagy technikai kavitáció során keletkezett buborékokat az áramlás továbbsodorja, és egy nagyobb helyi nyomású térben, a gőzzel telt üregekben kondenzáció lép fel, azaz a kavitációs magok összeroppannak, feltöltődnek folyadékkal. Ez gerjeszt jól mérhető rezgéseket a berendezésen, sőt bizonyos nagyságot elérve füllel is jól hallható sercegő, ropogó hangot hallat. Ha az üreg összeomlása a berendezés határoló falainak közelében történik, a periodikus mechanikai hatások a szilárd falat veszik igénybe, amelyeknek következménye lehet az 1. ábrán látható erózió.

Ha a szivattyú járókerék előtt a kavitációs buborékszóna a teljes keresztmetszetet kitölti, a folyadék oszlop megszakad, a szivattyú „elejti” a folyadékot, megszűnik a közeg szállítása. A folyadéknak a szívócső felől, a járókerék belépő élénél van a legkisebb nyomása. Itt léphet fel először a kavitáció. Az 1. ábrán jól látható, hol volt a járókerék belépő éle, ugyanis az erózió azt roncsolta meg.

3. Szívóképesség, jelleggörbék

Felmerül a kérdés, hogyan kerülhető el a gőzbuborék képződés okozta gond? Ehhez az előadáson megismerjük a berendezésben rendelkezésre álló $NPSH_a$ (available), illetve a szivattyú által a szállítandó térfogatáramnál rendelkezésre bocsátandó $NPSH_r$ (required) szívómagasságot. A definíció az alábbi:

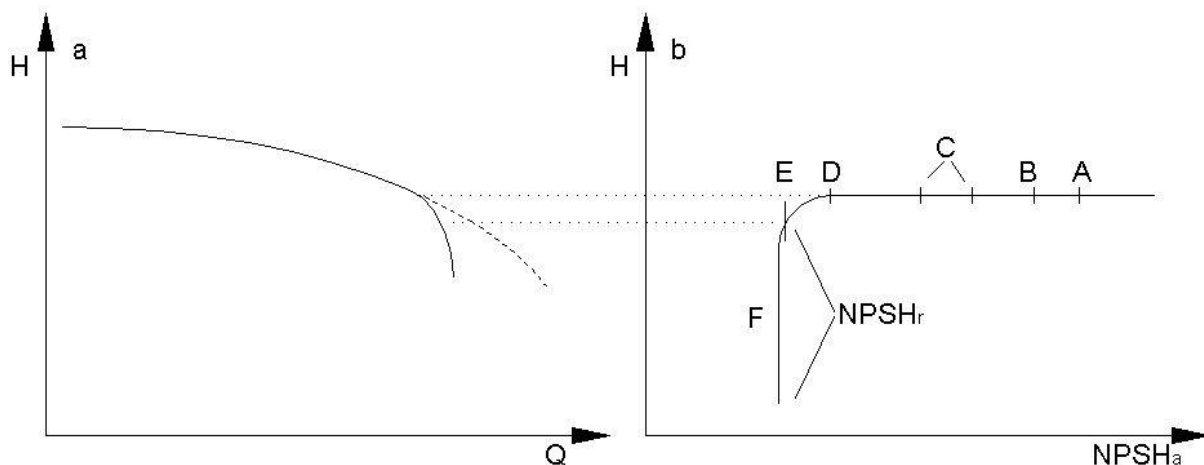
$$NPSH_a = \frac{p_0 - p_g(t)}{\rho g} - H_{sg} - e_s - h'_s(Q), \quad (1)$$

itt a szívóoldalon a vízfelszín feletti nyomást p_0 -lal, a szállított közeg hőmérsékletéhez tartozó telített gőz nyomását $p_g(t)$ -vel, a szívóoldali vízszint mélységét a szivattyú szívócsőcsőjének középpontjától H_{sg} -vel, a szívócső középpontjának és a szivattyú forgástengelyébe eső referenciapontnak a szintkülönbségét e_s -sel jelöltük. (Ez esetünkben zérus, $e_s = 0$.) Végül $h'_s(Q)$ jelöli a szívócső veszteségmagasságát az összes benne lévő szerelvény veszteségmagasságával egyetemben. A technikai kavitáció mentes üzem határán éppen teljesül az $NPSH_a = NPSH_r$ egyenlőség. Az alábbi egyenlőtlenség betartásával elkerülhetők az üzemi problémák:

$$NPSH_r < NPSH_a. \quad (2)$$

Nagy nyomású kazán-tápszivattyúknál az irányadó $NPSH_a$ érték mintegy 1,5÷2-szerese az $NPSH_r$ értéknek, kivédve a tranziens üzemállapotokból és az üzemzavarokból adódó eltéréseket. Azért van szükség ezekre a biztonsági tartalékokra, mert a fizikai és technikai kavitációnak nincs éles határa. Míg az előbbi jelenség normál üzemben is előfordul (mivel a folyadék nem tökéletesen tiszta), enyhe erózió felléphet, de a hidraulikai jellemzőkben ez nem jelentkezik. A technikai kavitáció már észrevehető hatásfok csökkenéssel és jelentős roncsoló hatással jár, a két forma közötti átmenet folyamatos.

Ha elvégezzük a szivattyú jelleggörbe mérését, azt tapasztaljuk, hogy növelve a térfogatáramot, a jelleggörbe egy pontnál letörik, azaz a *2a. ábra* szaggatott jelleggörbétől elválik. Az elválási pontban kezd kialakulni a technikai kavitáció. Egy-egy állandó térfogatáramnál elvégezhető a leszívási mérés, azaz annak vizsgálata, hogy az adott térfogatáramnál mekkora a szivattyú $NPSH_r$ értéke. Kiindulásként tartjuk a szivattyú Q térfogatáramát állandó értéken. Az $NPSH_a$ értéke az (1) egyenlet szerint a szívóoldali paraméterek (pl. beépített fojtás) segítségével változtatható. Ahhoz, hogy a rendszerben Q =állandó fennmaradjon, a nyomóoldalon is be kell avatkozni. Ha a szívóoldalon nő a geodetikus szállítómagasság (H_{sg}), vagy a szívóoldali ellenállás (h'_s), illetve a szívótér nyomása csökken (p_0), akkor a nyomóoldali szabályozó szerelvényt nyitni kell, hogy a rendszer jelleggörbéje ne változzék. Ha az (1) képlet szerint az $NPSH_a$ értéket csökkentjük, és minden ilyen új számértéknél megmérjük a szivattyú H szállítómagasságát (pl. manométer segítségével), akkor egy kritikus $NPSH_a$ értéknél a H szállítómagasság jelentősen csökken, azaz a görbe letörik. Ezt szemlélteti a *2b. ábra*. A letörési értéknél lesz az adott Q =állandó értékhez tartozó $NPSH_r$ érték.



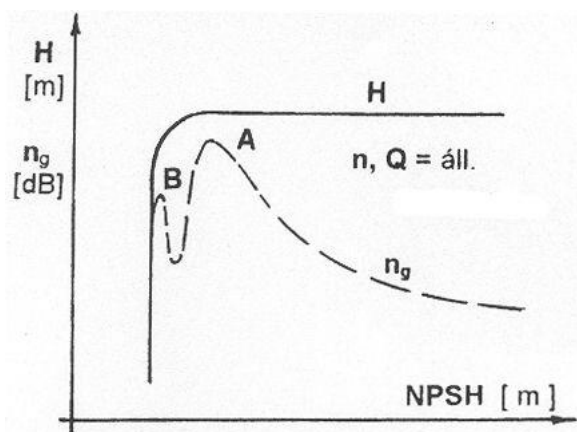
2. ábra. a, Jelleggörbe és b, leszívási görbe

A *2b. ábrán* látható $NPSH_a - H$ diagram **A** pontjában jelenik meg a kavitációra utaló enyhe ropogó hang. A **B** pontban a lapátok belépő élénél megjelenik a buboréköna. A lapátok eróziós roncsolódása az egyre növekvő zaj mellett a **C** pontban indul meg. Látható, hogy a szivattyú jelleggörbéjén még semmilyen változást nem tapasztalunk, de a berendezés már károsodni kezd. A **D** pont jelenti azt a határt, ami után csökkentve az $NPSH_a$ értéket megindul a jelleggörbe esése (baloldali diagram). Az **E** pont jelenti a tűrhető kavitációs üzemet, noha jelentős letörés tapasztalható (3-5%). Az **F** pont környezetében a járókerék környezetében buborékfelhő áramlik. A szivattyú újra elcsendesedik, szállítómagassága leesik, hatásfoka romlik, bár teljesítményfelvétele is jelentősen lecsökken. Az eróziós roncsoló hatás is megszűnik. A szivattyú üzemelése nem megbízható, ugyanis bármikor „elejtheti” a folyadékot.

A b. ábra mutatja, hogy az $NPSH_a$ függvényében mikor következik be jelentős változás a szállítómagasságban. A letörés után (pl. F pont) már nem igaz a (2) egyenletben megfogalmazott feltétel, azaz a rendszer kavitál. Ki kell jelölni egy kritikus ΔH szállítómagasság csökkenést, ami nagyobb, mint a mérési hibakorlát. Ez a ΔH érték a szállítómagasság mintegy 2-3%-a szokott lenni. Több $Q = \text{állandó}$ feltételű mérést elvégezve a szivattyúra megkapjuk az $NPSH_r - Q$ függvénykapcsolatot, ami éppen olyan fontos üzemi jellemző, mint a $H - Q$ jelleggörbe.

A folyadékok gáztartalma kedvező is lehet a kavitáció okozta rezgésekre, erózióra. Néhány térfogat-százalékos folyadékból kivált, illetve külső téréből bevezetett gáz csökkenti a kavitációs zóna összeroppanásakor keletkező zajt, káros rezgéseket, roncsoló hatást. Ezt a megoldást azonban nem minden technológiai folyamatnál engedhetjük meg (pl. fűtészálózati, vegyi folyamatok). A közegben jelen lévő gáz adott tömegáram mellett a keverék kisebb sűrűsége miatt növeli a térfogatáramot. Az átáramló térfogatáram többlet a berendezés eredő ellenállását (h'_s) növeli, ami az (1) egyenlet szerint az $NPSH_a$ értéket csökkenti. A gáz (leggyakrabban levegő) rezgéscsökkentő hatásáról nem kell lemondani, ugyanis közvetlenül a szivattyú szívócsonc előtt bevezetve az $NPSH_a$ esése elkerülhető, a hatásfok azonban a többlet-térfogatáram miatt csökken.

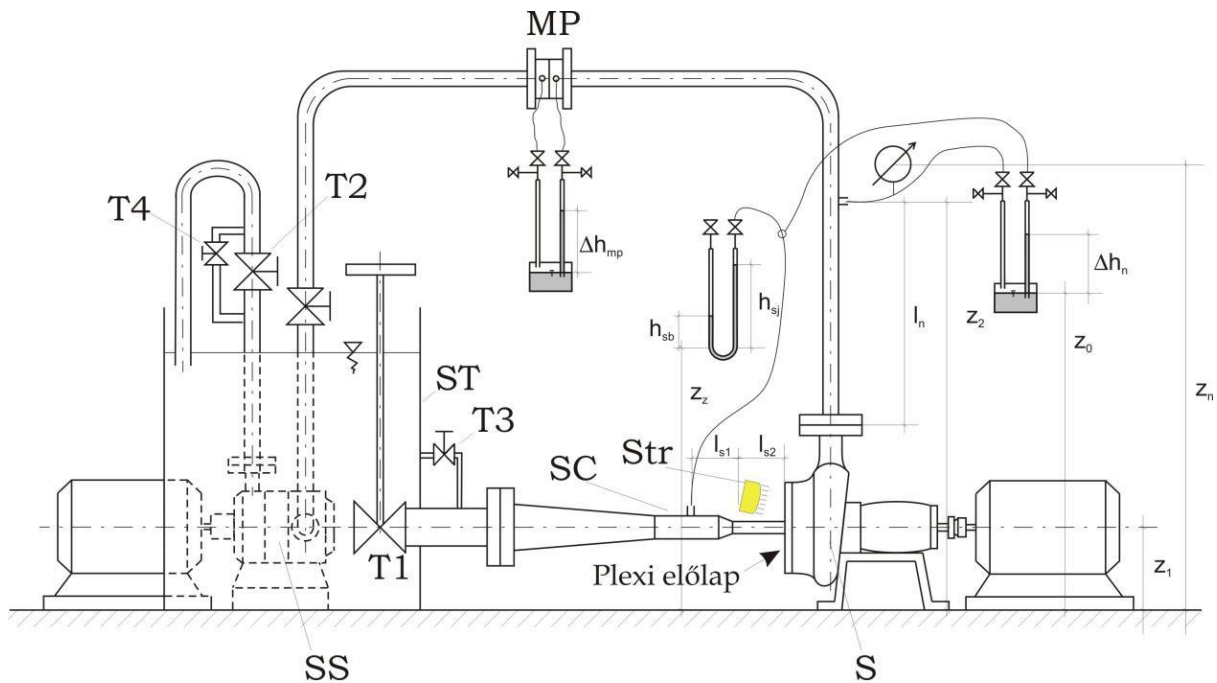
A kavitáció, az általa okozott rezgés alapján is detektálható. Ennek a módszernek az az előnye is megvan, hogy a kismértékű – fizikai – kavitáció is detektálható, ellentétben a hidraulikai paraméterekből történő detektálással, ami csak a technikai kavitációt mutatja ki. A vizsgálatot mindkét esetben állandó térfogatáram mellett, a szívócső ellenállásának növelésével – ezzel az $NPSH_a$ csökkentésével – kell elvégezni. A 3. ábra mutatja be az u.n. leszívási (szállítómagasság változása az $NPSH_a$ függvényében) görbét és a szivattyú csigaházán mérhető gyorsulásszint változását. Látható, hogy a zajszint vagy rezgésszint (n_g) már jóval a szállítómagasság letörése előtt megemelkedik, mely fizikai kavitáció – kis buborékok megjelenésére és összeroppanására, azaz igen erős eróziós hatású kavitáció – jelenlétére utal. Ez azonban a hidraulikai paraméterekben még nem jelentkezik.



3. ábra. A leszívási görbe és a rezgésszintek kapcsolata

4. Mérőberendezés

A 4. ábrán bemutatott mérőállomás egyfokozatú, plexi előlapon szivattyúra épült, és így lehetővé válik a szivattyúban kialakuló kavitációs áramlás vizuális megfigyelése. Az S jelű szivattyú a ST szívóoldali tartályból szívja a vizet a T1 és T3 tolózárokon keresztül, mely a szívócső ellenállásának növelésére alkalmas. A szívó és nyomóoldali nyomást klasszikus műszerekkel (higanyos manométerrel) mérjük, a vízhozam mérésekhez az MP mérőperemet építettük be. A plexi előlapon keresztül stroboszkóp Str lámpával világítjuk meg a hengeres lapátokkal készített nyitott járókereket. A stroboszkóp felvillanási frekvenciáját a fordulatszámmal azonos értékre beállítva a járókerék lapátok állni látszanak, és a lapát felületén kialakuló kavitáció szemmel jól érzékelhető.



4. ábra. A vizsgált berendezés

A szivattyú H szállítómagassága és a Q térfogatárama az ábra jelöléseinek megfelelő Δh_n és Δh_{mp} értékekből az alábbiak szerint határozható meg:

$$Q = \alpha(D, d, Q) \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{mp}}{\rho_{viz}}} = \alpha(D, d, Q) \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot g (\rho_{Hg} - \rho_{viz}) \Delta h_{mp}}{\rho_{viz}}} \quad (3)$$

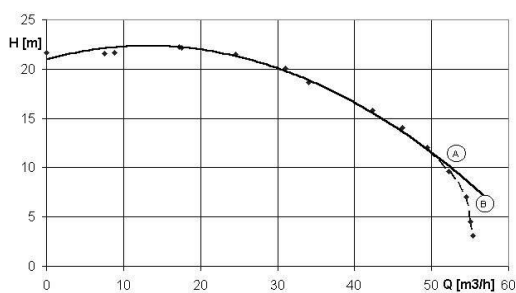
$$H = \frac{\rho_{Hg} - \rho_v}{\rho_v} \Delta h_n - (z_2 - z_1 - l_n) + \frac{Q^2}{2g} \left[\lambda \left(\frac{l_{s1}}{d_{s1} A_{s1}^2} + \frac{l_{s2}}{d_{s2} A_{s2}^2} + \frac{l_n}{d_n A_n^2} \right) + \frac{1}{A_n^2} - \frac{1}{A_{s2}^2} \right] \quad (4)$$

A szivattyú SC szívócsöve szűk, és a T1 és T3 tolózárokkal együtt olyan szívóoldali ellenállást jelentenek, hogy a jelleggörbe nagy térfogatáramokhoz tartozó részén már kavitáció alakul ki és a jelleggörbe itt letörik (5. ábra).

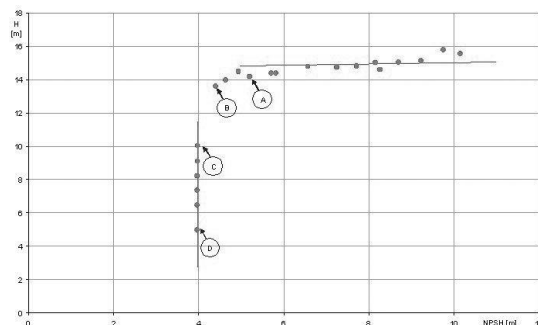
A mérés során a szivattyú $NPSH_r(Q)$ jelleggörbéjének pontjait kívánjuk meghatározni leszívási görbe mérés alapján. A $H(Q)$ jelleggörbe egy olyan pontjából indulunk ki, ahol a vizuális megfigyelések sem mutatnak buborék-keletkezést. A térfogatáram állandó értékének megőrzése érdekében zárunk a T1 (majd T3) tolózárón és nyitunk a T2 és T4 tolózárón. A H szállítómagasság változását az $NPSH_a$ függvényében ábrázoljuk. (6. ábra) Az $NPSH_a$ értékét a következő összefüggéssel határoztuk meg a mért h_{sb} , h_{sj} értékekből:

$$NPSH_a = \frac{p_0 - p_g}{\rho_v \cdot g} - (h_{sj} - h_{sb}) \frac{\rho_{Hg}}{\rho_v} + h_{sj} + z_2 - z_1 + \frac{Q^2}{2g} \left[\frac{\lambda \cdot l_{s1}}{d_{s1} A_{s1}^2} + \frac{\lambda \cdot l_{s2}}{d_{s2} A_{s2}^2} + \frac{1}{A_{s1}^2} - \frac{1}{A_{s2}^2} \right] \quad (5)$$

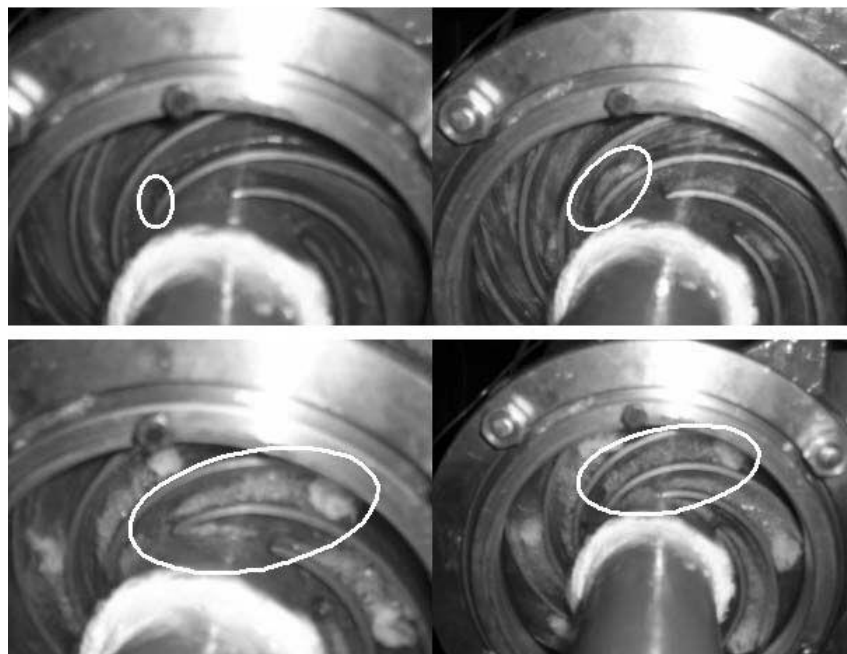
A szivattyú adott Q térfogatáramhoz tartozó $NPSH_r$ értékét az a pont adja meg, ahol a szállítómagasság kb. 3% esést mutat (6. ábra B pont). A kavitáció kialakulását egy ilyen, a szívócső ellenállását folyamatosan változtató méréssorozat esetén a plexi előlapos berendezésen vizuálisan is követni tudjuk.



5. ábra. Szivattyú jelleggörbe



6. ábra. Leszívási görbe



7. ábra. A kavitációs zóna fotói a 6. ábra A, B, C, D pontjaiban

5. Mérés menete

A mérés során egy – a mérést vezető oktató által megadott – térfogatáram melletti leszívási görbe felvétele a cél. A mérőberendezés ellenőrzése után az oktató a lent leírtaknak megfelelően elvégzi a mérés indítását. A mérést teljesen nyitott szívóoldali T1 és T3 tolózárállástól indítjuk, a segédzivattyú nyomócsonkján levő T2 és T4 tolózár segítségével beállítva a kívánt térfogatáramot. (Ennek részleteit lásd: leírás végén olvasható technikai információk). Az adott, mérőperemre kötött manométer kitérésből a beépített mérőperem paramétereinek ismeretében a (3) képletből meghatározható a térfogatáram az alábbi összefüggéssel, melyet a 8. ábra grafikonján is megadunk:

$$Q\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right] = 3.2472(\Delta h_{mp} [\text{mm}])^{0.5} \quad (6)$$

A mérést teljesen nyitott szívóoldali T1 tolózárállástól indítjuk, a segédzivattyú nyomócsonkján levő T2 és T4 tolózárak segítségével beállítva a kívánt térfogatáramot. A mérés során a szívóoldali tolózárát zárjuk, a nyomóoldali tolózárát meg nyitjuk a térfogatáram állandó értéken tartása érdekében. A T1 tolózár zárt állása után T3 zárásával folytatjuk. Minden mérési pontban leolvassuk a manométer kitérésüket és vizuálisan megfigyeljük a látható áramképet. A kavitáció megjelenésétől kezdve megmérjük a buborékkal teli kavitációs zóna hosszát a lapátózásban. A mérést addig ismételjük, amíg a szállítómagasság drasztikusan le nem török. Előtte a szívóoldali nyomáskülönbség a légköri nyomás közelébe kerül, innen a szívóoldali motoros zár rövid – esetleg kézzel történő – állításával tudjuk a letörő szakaszt is felvenni. A leolvasott értékek alapján kiszámoljuk a H szállítómagasság és az $NPSH_a$ értékét az alábbi összefüggésekkel – ezek a (4) és (5) egyenletből adódnak a megfelelő értékek behelyettesítésével:

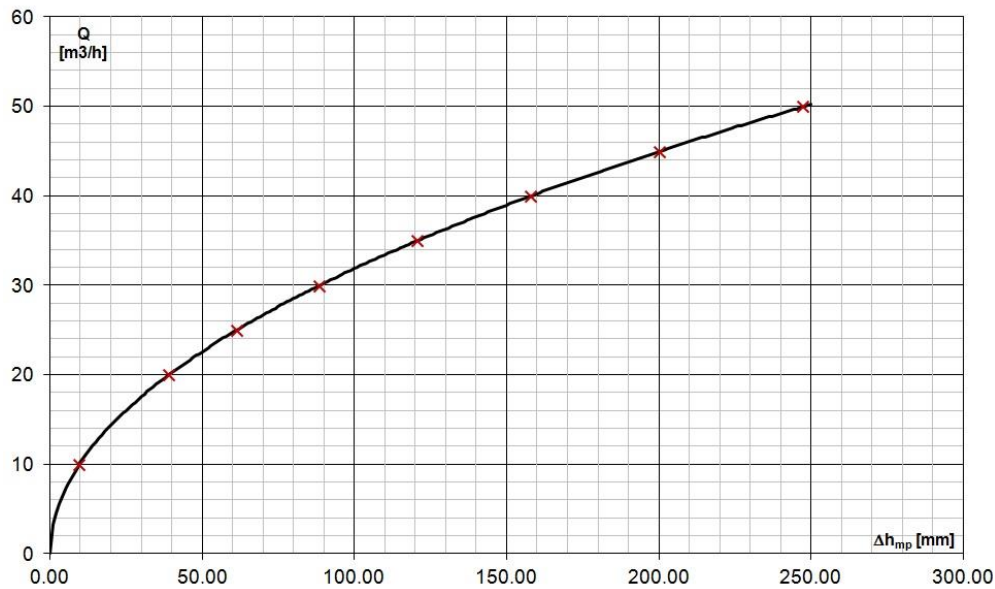
$$H[\text{m}] = \Delta h_n [\text{mm}] \cdot 12.6 / 1000 + 0.18 - 9781 \cdot \left(Q\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right] / 3600 \right)^2 \quad (7)$$

$$NPSH_a [\text{m}] = 11.13 + \frac{13.6}{1000} \cdot (h_{sb} [\text{mm}] - h_{sj} [\text{mm}]) + \frac{h_{sj} [\text{mm}]}{1000} - 10773 \cdot \left(Q\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right] / 3600 \right)^2 \quad (8)$$

A mérési adatokat az alábbi alakú táblázatba jegyezzük fel, ahol a fenti képletekkel ki tudjuk számolni a H és $NPSH_a$ értékeit is:

Ssz	n [1/min]	Δh_{mp} [mm]	Δh_n [mm]	h_{sb} [mm]	h_{sj} [mm]	Megfigyelés	zónahossz [mm]	Q [m ³ /h]	H [m]	NPSH _a [m]
1.										
2.										
...										

A számolt adatokból felvesszük az adott térfogatáramhoz tartozó leszívási görbét, melyen jelöljük a becsült zóna hosszakat is.



8. ábra. Mérőperem beállítása adott térfogatáramokhoz

6. Mérési eredmények feldolgozás

A tanszéki honlapon, a tárgy adatlapján az alaki és a tartalmi követelmények (mérési eredmények feldolgozása, hibaszámítás, stb.) egyaránt megtalálhatók.

6. Felkészülés a mérésre

1. A mérés eredmények feljegyzéséhez szükséges táblázat elkészítése.
2. Milliméterpapírt kell hozni az ellenőrző diagram elkészítéséhez.
3. Ismerni kell a mérési tájékoztatót. A tájékoztató ismeretét a mérés kezdetekor ellenőrizzük.

7. A berendezés további műszaki adatai

A motor típusa: EFK41K4 (Bláthy Ottó Villamosgépgyár)
A motor gyártási száma: 107755

A szivattyú típusa: BMS 25/48 (Diósgyőri Gépgyár)
A szivattyú gyártási száma: 7012/4166

8. Felkészülést ellenőrző kérdések

1. Ismertesse a kavitáció jelenségét, kialakulását!
2. Mi a fizikai, technikai és szuperkavitáció közötti különbség!
3. Írja fel a tanult $NPSH_a$ definícióját és magyarázza a tagokat!
4. Rajzolja le jellegre helyesen a leszívási jelleggörbét és ismertesse a fontosabb szakaszait!
5. Ismertesse a leszívási jelleggörbe mérésének menetét!
6. A leszívási jelleggörbe ismeretében milyen kritériumot tud felállítani az $NPSH_a$ értékére? Válaszát indokolja!
7. Ismertesse a mérés célját és a meghatározandó mennyiségeket!
8. Vázolja és ismertesse a mérőberendezést!

9. Mérési feladatok

- 1) Számolja ki a szivattyú hasznos teljesítményét kavitációmentes üzem esetén és hasonlítsa össze
a) a technikai kavitációs üzem hasznos teljesítményével!
b) a szuperkavitációs üzem hasznos teljesítményével!
- 2) Válasszon villanymotort (fordulatszám mérése szükséges, a motort fordulatszámát frekvenciaváltóval szabályozzuk), ha a szivattyú hatásfoka
a) 85%!
b) 75%!
- 3) Számolja ki a szívócsonkban az abszolút nyomás értékét és hasonlítsa össze az adott környezeti hőmérséklethez tartozó telítési gőznyomás értékével
a) technikai kavitációs üzem esetére!
b) szuperkavitációs üzem esetére!

10. Irodalom

- [1] Dr Fűzy Olivér: Áramlástechnikai gépek és rendszerek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991
- [2] Józsa István: Örvényszivattyúk, Info prod kiadó Kft., 2003
- [3] Dr. Garbai László: Hidraulikai számítások az épületgépészetben és az energetikában, 11.5. fejezet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007.

Technikai információk:

Indítás előtt ellenőrizendő (az oktató végzi el):

- tartály vízszintje (lépje el jócskán a szívóoldali T3 bypass-t)
- nyomóoldali tolózárak (T2 és T4) zárt állapotba
- szívóoldali tolózár (T1) legalább félig nyitott állapota (ellenőrző ablak a motoron)
- számítógép melletti kapcsolószekrény kapcsolója RS állásban van

Ha a motoros tolózár (T1) nem mozog (a gombok lenyomására a számítógép melletti –lila-kapocsdoboz lámpás kapcsológombjának egyike sem villog), akkor valószínűleg a fali dugalj van kihúzva.

Indítás menete (oktató végzi el):

1. szivattyú S indítása a bejárat melletti kapcsolószekrényről. (A nagy dobozos manométer kb. 1,8 bart mutasson)
2. SS segédszivattyú indítása frekvenciaváltóval (szekrény áram alá helyezése, majd a zöld gomb a frekvenciaváltón)
3. S nyomócsonkján lévő T2 és T4 tolózár nyitása, a mérőperemhez kötött manométer szintjének figyelése mellett
4. Stroboszkóp (Str) fali biztosítékainak felkapcsolása, majd a stroboszkóp bekapcsolása

Javasolt mérési tartomány 2000-2200 l/min környékén, 35-40 m³/h szállítás mellett. Ha indításnál a nagy dobozos manométeren figyeljük a zárasi nyomást, akkor ezekhez a fordulatszámokhoz kb. 1,8-2 bar tartozik, a térfogatáram pedig 120-160 Hgmm kitérésnek felel meg a mérőperem (MP) manométerén.

Mérés folyamata:

- térfogatáram beállítás az SS szivattyú nyomóoldali T2 és T4 (finombeállítás) tolózárjával
- fojtás beállítása a motoros (T1) tolózárrel, amíg meg nem indul a technikai kavitáció, azután fojtás a bypass tolózárrel (T3)

A mérés folyamán figyelni kell:

- az első mért pont után a következőt csak akkor érdemes felvenni, ha a motoros tolózárrel már annyit zártunk, hogy változott a szívómagasság
- a gömbcsap használatával kiengedjük a vizet a tartályból, ami egyrészt változtatja a szívómagasságot, másrészt levegőt szívhat a rendszer
- ha a segédszivattyú (SS) manométere sokáig mutat 0 bar alatti értéket, akkor a tömszelencéi beéghetnek. Ha valamelyik füstölni kezdene, akkor a nyomóoldali tolózárakat (T2 és T4) zárjuk el, így biztosítva elegendő csurgalékvizet a tömszelencék visszahűtéséhez!

Leállítás:

- mint az indítás, csak fordítva