

# BADANIE POMPY WIROWEJ

## Cel ćwiczenia:

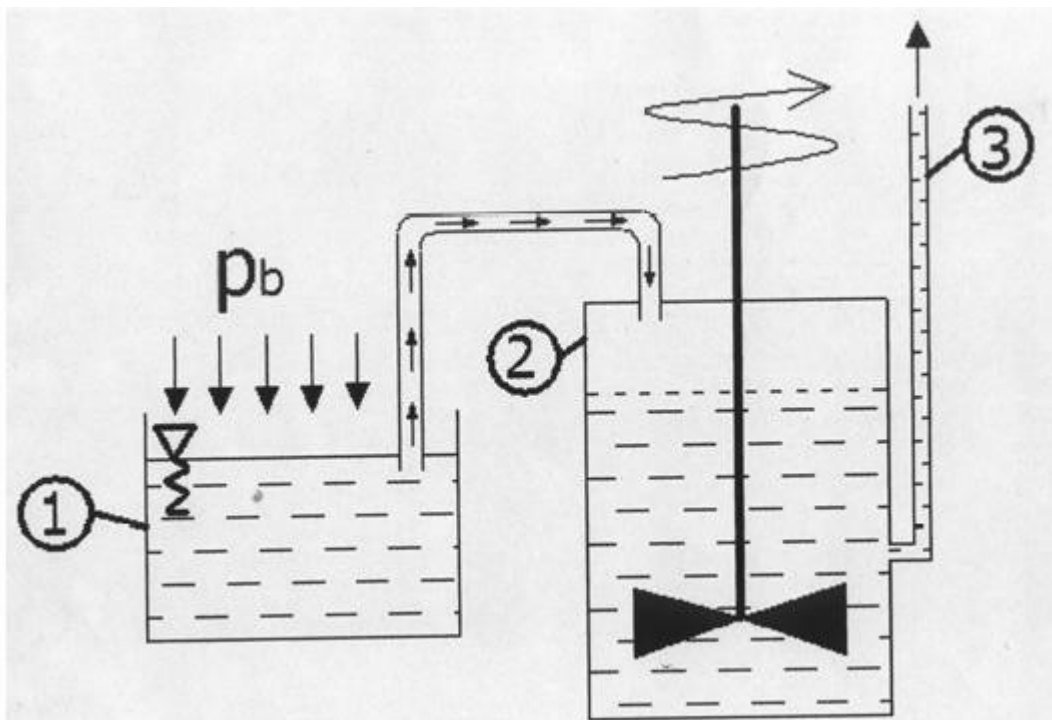
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania pompy wirowej, oraz przedstawienie metodyki pomiarów i obliczeń charakterystyki pompy wraz z wyznaczeniem optymalnego punktu pracy oraz zakresu pracy maszyny.

## Wiadomości wstępne

Pompami nazywamy maszyny służące do podnoszenia cieczy z poziomu niższego na poziom wyższy lub do przetłaczania cieczy z obszaru o ciśnieniu niższym do obszaru o ciśnieniu wyższym lub też do transportu cieczy w poziomie. Pompa stanowi maszynę bierną /roboczą/, która przenosi energię mechaniczną z jakiegokolwiek zewnętrznego źródła energii na ciecz przez nią przepływającą: pompa powoduje zatem wzrost energii przepływającej przez nią cieczy. Energia mechaniczna pobierana od silnika napędowego jest w wirniku zamieniana w energię kinetyczną pompowanej cieczy. W kolejnych elementach układu przepływowego (kierownice, kanały spiralne, dyfuzory) energia kinetyczna przekształcana jest we wzrost ciśnienia. Energia cieczy u wylotu z pompy zużywana jest na podniesienie cieczy i pokonanie oporów hydraulicznych w przewodach. Wynika z tego jasno, że wysokość podnoszenia zależy od prędkości końca łopatki. Chcąc zatem powiększyć wysokość podnoszenia pompy musimy zwiększyć średnicę wirnika lub zwiększyć prędkość obrotową maszyny. Nie możemy jednak robić tego w nieskończoność, gdyż ograniczeniem są tutaj względy wytrzymałościowe oraz tzw. straty brodzenia. Okazuje się, że z jednego stopnia możemy osiągnąć 40 – 60 m (stupa wody)  $H_u$ .

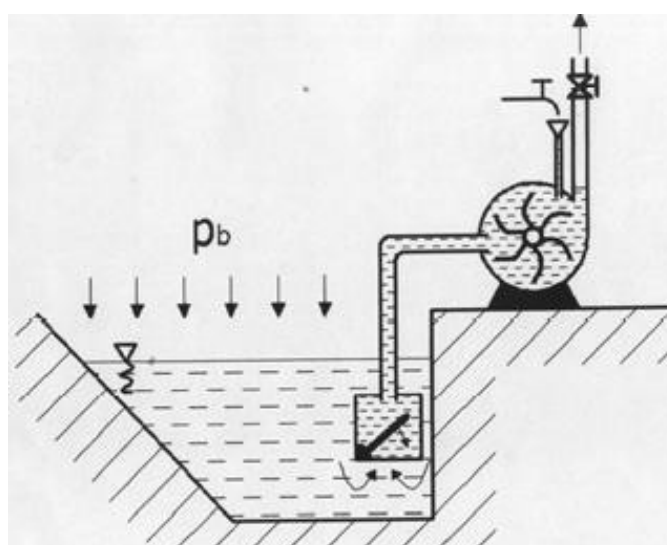
## Zasada działania pompy

Działanie pompy wirowej polega na tym, iż obracający się wirnik dzięki odpowiednio ukształtowanym łopatką wprawia w ruch cząsteczki cieczy (znajdujące się w przestrzeniach międzyłopatkowych) od strony ssawnej ku stronie tłocznej. Spowodowane tym ruchem zmniejszenie się ciśnienia u wlotu do pompy (wirnika) wywołuje zjawisko ssania (pod warunkiem, że na lustro w zbiorniku dolnym działa odpowiednio wyższe ciśnienie – zazwyczaj jest to ciśnienie atmosferyczne) cieczy ,przez rurę ssawną do wnętrza pompy.



Rys. 1.

W celu łatwiejszego zrozumienia działania pompy na rysunku 1 przedstawiono dwa naczynia (otwarte i zamknięte) połączone ze sobą przewodem. Jeżeli wirnik (śmigło) w naczyniu 2 wprawimy w ruch, to ciecz z tego naczynia (znajdująca się w przestrzeni międzyłopatkowej), na skutek siły odśrodkowej będzie wtłaczana do króćca 3, a poziom w tym naczyniu się obniży i nad lustrem wody powstaje „pusta” przestrzeń, w której panuje podciśnienie. W „pusty” obszar napłynie ciecz z otwartego naczynia 1, na skutek różnicy ciśnień, barometrycznego napierającego na lustro wody w „jedynce” oraz podciśnienia w naczyniu 2. W ten sposób realizowany jest przepływ ze zbiornika 1 do króćca 3. To selektywne tłumaczenie można przenieść na rzeczywisty układ pompowy pokazany na rysunku 2.



Rys. 2

Zbiornik dolny, pełni tutaj rolę naczynia 1 a pompa rolę naczynia 2. Sytuacja jest analogiczna jak powyżej, gdyż na lustro w zbiorniku dolnym działa ciśnienie barometryczne  $p_b$  odpowiadające ok. 10 m H<sub>2</sub>O, na wlocie do wirnika podczas jego pracy powstaje podciśnienie („przeźreń pusta”), czyli na skutek różnicy ciśnień woda dopływa do wirnika, który w wyniku siły odśrodkowej wtłacza wodę do króćca tłoczego i dalej do instalacji.

UWAGA. Aby pompa zadziałała, należy ją przed uruchomieniem napełnić (zalać) pompowaną cieczą - dotyczy to kadłuba i przewodu ssawnego, gdyż pompa wirowa nie jest w stanie sama zassać czynnika bez uprzednio usunięcia z niej powietrza.

Nie dotyczy to pomp krążeniowych oraz pomp o wirującym pierścieniu wodnym.

## Charakterystyka pompy

Nominalne parametry pracy pompy podane na tabliczce znamionowej nie zawsze są wystarczające dla użytkownika, gdyż maszyny rzadko pracują w punkcie odpowiadającym tym wielkością. Pompy wirowe jako urządzenia, które samoczynnie dostosowują się do warunków układu, pracują w zależności od warunków z różnymi parametrami. Aby trafnie te wielkości określić, musimy znać zależność w/w wielkości w całym zakresie pracy tj. od  $\dot{V}_{min}$  do  $\dot{V}_{max}$ . Charakterystyka pompy to zależność jednego z parametrów jej pracy, np. wysokości podnoszenia, mocy, sprawności od parametru podstawowego jakim w maszynach przepływowych jest wydajność.

Rozróżniamy trzy podstawowe charakterystyki pracy pompy:

- charakterystyka przepływu  $H_u = f(\dot{V})$ , przedstawia zmianę użytecznej wysokości podnoszenia  $H_u$  od wydajności  $\dot{V}$ . Jest to główna charakterystyka pracy pompy, często nazywana krzywą dławienia.
- charakterystyka mocy  $N = f(\dot{V})$  odniesiona do wału, za pomocą którego silnik przekazuje moc na pompę.
- charakterystyka sprawności  $\eta = f(\dot{V})$  określa zmianę stosunku mocy użytecznej do mocy na wale, którą pobiera pompa.

W zależności od sposobu sporządzenia rozróżniamy następujące rodzaje charakterystyk:

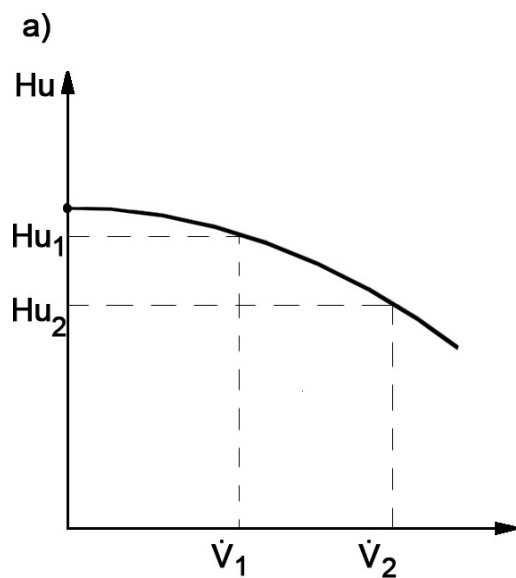
- wykreślne, analityczne (podane w formie równania),
- doświadczalne (wyznaczone na stanowisku), teoretyczne (wyznaczone w oparciu o odpowiednie wzory),
- wymiarowe – poszczególne wielkości mają określone jednostki ( $[m]$ ,  $[W]$ ,  $[m^3/s]$ ),
- bezwymiarowe - parametry pracy odniesione są do wielkości nominalnych  $H_u/H_{un}$ ,

$\dot{V}/\dot{V}_n$  .... lub optymalnych.

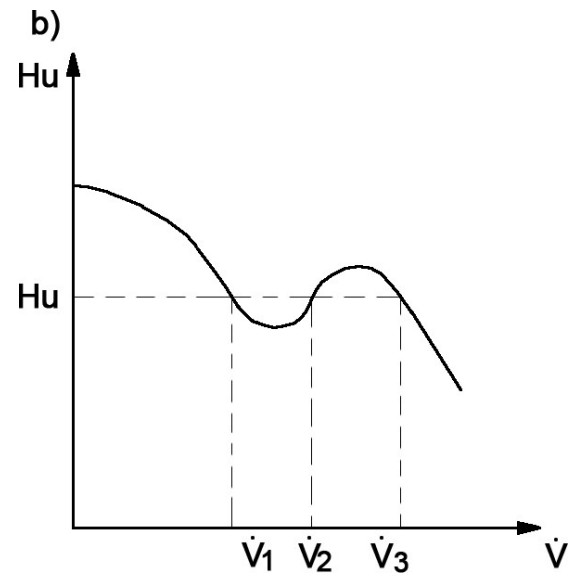
Mogą też być użyte odrębne wielkości bezwymiarowe, otrzymane na podstawie teorii podobieństwa.

W zależności od kształtu rozróżniane charakterystyki mogą być:

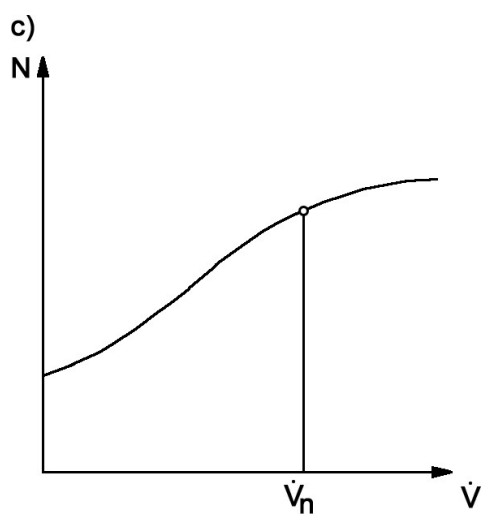
- stateczne, niestateczne (dot. krzywych przepływu, rys. 3 i 4),
- przeciążalne, nieprzeciążane (dot. krzywych mocy, rys. 5 i 6),
- strome, płaskie (dot. krzywych przepływu).



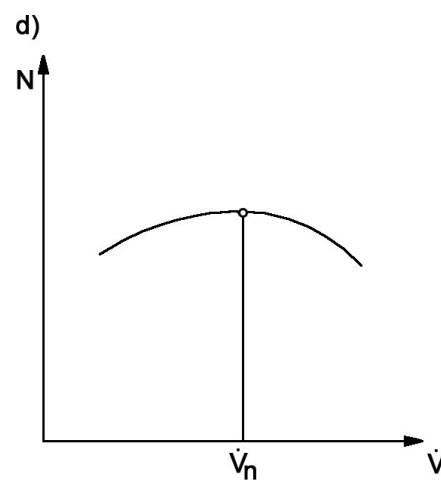
Rys. 3.



Rys. 4.



Rys. 5.



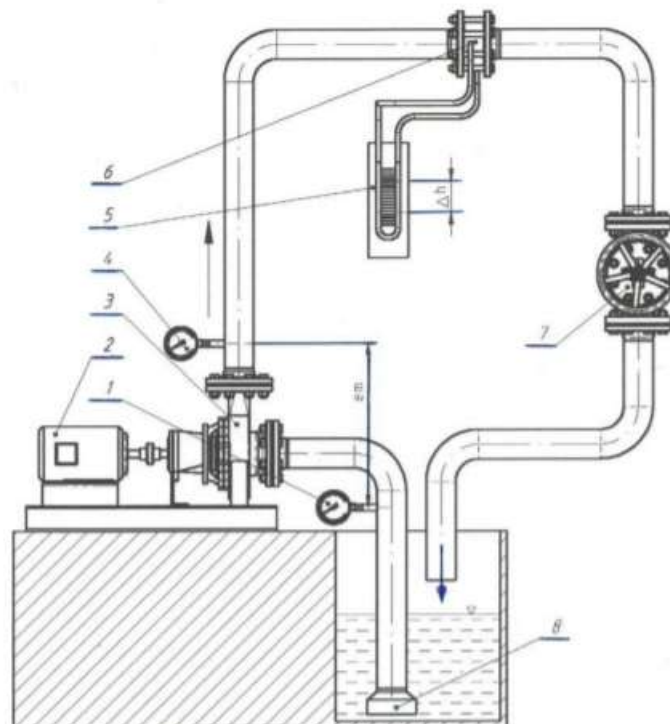
Rys. 6.

Pompa jako urządzenie samo w sobie nie ma racji bytu. Staje się maszyną użyteczną z chwilą kiedy znajdzie się w układzie pompowym. Istnieje ścisła współzależność pomiędzy parametrami pracy pompy i układu, w którym jest ona zainstalowana. Mówi nam o tym tzw. punkt pracy, który aby wyznaczyć musimy znać charakterystykę przepływu pompy jak i charakterystykę układu pompowego (instalacji). Charakterystyka instalacji jest określona przez wszystkie elementy układu pompowego i nie zależy od pompy. Wstawiając w układ dowolną pompę, spowodujemy odpowiedni przepływ cieczy i ustalenie się określonego punktu pracy w układzie. Szereg takich punktów wyznacza charakterystykę  $H_{ukł}$ . Niezależnie od tego jakie pompy wstawimy do układu charakterystyka ta nie ulegnie zmianie.

### Wykonanie ćwiczenia

Zasadniczym celem ćwiczenia jest wyznaczenie zależności:  $H_u = f(\dot{V})$ ,  $N_u = f(\dot{V})$  oraz  $\eta = f(\dot{V})$ , aby wyznaczyć powyższe krzywe należy zapoznać się ze stanowiskiem pomiarowym oraz wielkościami fizycznymi potrzebnymi do ich obliczenia.

$$D_s = D_t$$



Rys. 7. Schemat stanowiska

- 1 – wakuometr do pomiaru podciśnienia na wlocie do pompy,
- 2 – silnik elektryczny,
- 3 - pompa,
- 4 – manometr sprężynowy do pomiaru ciśnienia na wylocie z pompy,
- 5 – manometr rtęciowy do pomiaru różnicy ciśnień na zwężce,
- 6 – zwężka pomiarowa (kryza),
- 7 – zawór dławiący,
- 8 – kosz ssawny.

### 1. Obliczenie strumienia przepływu - wydajności pompy $\dot{V}$

Wydajność pompy to rzeczywisty strumień cieczy przepływający przez króciec tłoczny pompy. Pomiar strumienia objętości wody wykonany zostanie przy pomocy zwężki pomiarowej, typu kryza ISA z pomiarem przytarczowym zgodnie z PN – 93/M- 53950/01, liczymy go wg. następującej zależności:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (1)$$

dla zainstalowanej zwężki :

średnica zwężki  $d = 56.5 \text{ mm}$

średnica rurociągu  $D_s = D_t = 80 \text{ mm}$

$C$  – współczynnik przepływu wg. PN-93/M-53950/01

$\varepsilon$  - liczba ekspansji, dla wody równa 1

$\Delta p = \rho_{Hg} g \Delta h$  – spadek ciśnienia na zwężce  $[Pa]$

$\Delta h$  – spadek wysokości ciśnienia na zwężce  $[m]$

$g$  – przyspieszenie ziemskie  $[m/s^2]$

$\beta = \frac{d}{D}$  – współczynnik przewężenia zwężki

ciecz manometryczna: rtęć o gęstości  $\rho_{Hg} = 13595 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

ciecz mierzona: woda o gęstości  $\rho_{H_2O} = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

## 2. Obliczenie użytecznej wysokości podnoszenia pompy $H_u$ .

**Użyteczna wysokość podnoszenia pompy**, to teoretyczna wysokość na jaką pompa podniosłaby wodę, gdyby w układzie nie występowały straty (rys. 8). Inaczej, jest to wartość wysokości ciśnienia wytwarzana przez pompę w danych warunkach przepływu. Liczymy ją wg. następującej zależności:

$$H_u = \frac{p_t - p_s}{\rho g} + e_m + \frac{c_t^2 - c_s^2}{2g} \quad [m] \quad (2)$$

gdzie:

$p_t$  – ciśnienie za pompą w króćcu tłocznym  $[Pa]$ ,

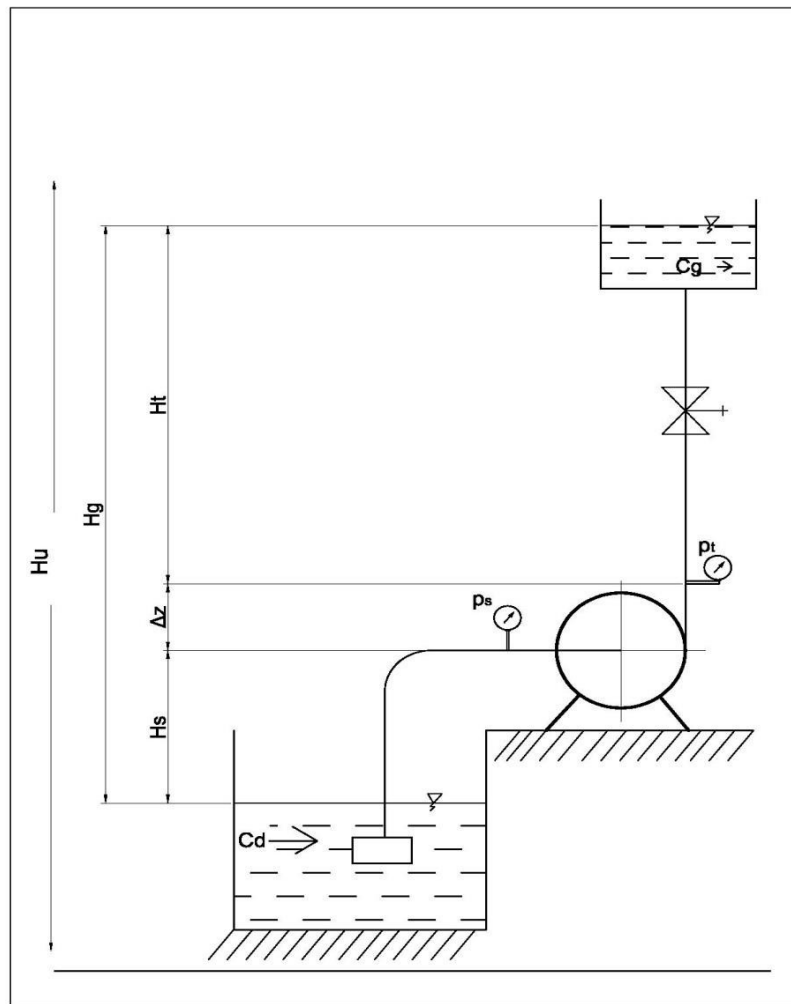
$p_s$  – ciśnienie przed pompą w króćcu ssawnym  $[Pa]$ ,

$e_m$  – przewyższenie manometryczne (oznaczane też jako  $\Delta z$ )  $[m]$ ,

$c_t, c_s$  – prędkość w króćcu tłocznym i ssawnym  $[m/s]$ ,

$\rho$  – gęstość cieczy przepływającej przez pompę  $[kg/m^3]$ ,

$g$  – przyspieszenie ziemskie  $[m/s^2]$



Rys. 8. Schemat układu pompowego

$H_s$  – wysokość ssania [m]

$H_t$  – wysokość tłoczenia [m]

$e_m (\Delta z)$  - przewyższenie manometryczne [m]

$H_g$  – wysokość geometryczna [m]

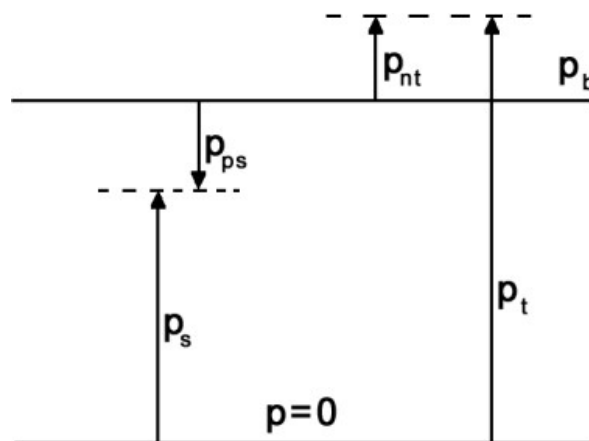
$H_u$  – wysokość użyteczna [m]

$c_t, c_s$  – prędkość w rurociągu tłocznym oraz ssącym [m/s]

$\rho$  – gęstość przetłaczanego czynnika [ $kg/m^3$ ]

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ]

**UWAGA.** Ponieważ podczas badania pompy, mierzone ciśnienia to wartości względne ( $p_{nt}$  i  $p_{ps}$ ) a w równaniu (2) występują wartości bezwzględne więc poniżej przedstawiono przejście z jednych na drugie.



Rys. 9.

$$p_t - p_s = (p_b + p_{nt}) - (p_b - p_{ps}) = p_{nt} + p_{ps}$$

w naszym przypadku  $D_s = D_t = 80 \text{ mm}$  (rys. 7)

zakładamy, że  $\dot{V}_s = \dot{V}_t$

czyli:  $c_s = c_t$  a zatem wyrażenie  $\frac{c_t^2 - c_s^2}{2g} = 0$

ostatecznie  $H_u = \frac{p_{nt} + p_{ps}}{\rho g} + e_m$  (3)

$p_{nt} - [Pa]$



$$p_{ps} - [Pa]$$

$$e_m = 0,5 m$$

czyli w takim przypadku gdy  $d_s = d_t$ , wysokość użyteczna równa jest wysokości manometrycznej  $H_u = H_m$ .

**Manometryczna** wysokość podnoszenia pompy to suma wskazań przyrządów pomiarowych na ssaniu i tłoczeniu lub inaczej jest to przyrost ciśnienia w pompie w metrach słupa wody.

**Geometryczna** wysokość podnoszenia pompy  $H_g$ , to odległość między poziomami cieczy w zbiorniku dolnym a górnym (rys. 8) i jest to faktyczna wysokość na jaką pompa podnosi ciecz w układzie.

### 3. Obliczenie mocy użytecznej

Moc użyteczna pompy  $N_u(W)$  – jest to strumień energii przekazany strumieniowi cieczy między króćcem ssawnym a tłocznym pompy lub inaczej jest to moc z jaką ciecz wypływa z pompy

$$N = \dot{L} = \dot{m} \int_1^2 v dp = \dot{V} (p_2 - p_1)$$

w naszym przypadku

$$\Delta p = \rho g H_u$$

ostatecznie

$$N_u = \dot{V} \rho g H_u \quad [W] \quad (4)$$

$$H_u - [m]$$

$$\dot{V} - [m^3/s]$$

### 4. Obliczenie sprawności ogólnej pompy

**Sprawnością ogólną pompy** nazywamy stosunek mocy (użytecznej  $N_u$ ) z jaką ciecz wypływa z pompy do mocy dostarczonej na jej wał ( $N_w$ ). Moc na wale albo jest mierzona (np. dynamometrem kołyskowym) albo ją obliczamy, jak w naszym przypadku jako iloczyn mocy elektrycznej ( $N_{el}$ ) pobieranej z sieci i sprawności silnika elektrycznego napędzającego pompę.

$$\eta_o = \frac{N_u}{N_w} = \frac{N_u}{N_{el} \cdot \eta_{sil}} \quad (5)$$

$$N_u = [W], \quad N_{el} = [W], \quad N_{sil} = 0,95 \div 0,96$$

### Punkt pracy pompy

Aby zaistniał przepływ w układzie pompowym, musi być spełniony następujący warunek, energia dostarczona cieczy przez pompę w jednostce czasu, musi być równa energii potrzebnej do przepływu strumienia  $\dot{V}_{ukł}$  w instalacji. Ponieważ  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  to moc, można więc zapisać że moc pompy powinna odpowiadać mocy cieczy przepływającej w układzie czyli  $N_u = N_{ukł}$ , inaczej:

$$\dot{V} \rho g H_u = \dot{V}_{ukł} \rho g H_{ukł}$$

gdzie:

$$\dot{V} = \dot{V}_{ukł}$$

$$H_{ukł} = H_g + \frac{p_g - p_d}{\rho g} + \Delta h_{ss} + \Delta h_{st} + \frac{c_g^2 - c_d^2}{2g} \quad [m]$$

$p_g$  - ciśnienie w zbiorniku górnym [Pa]

$p_d$  - ciśnienie w zbiorniku dolnym [Pa]

$\Delta h_{ss}$  - straty energii na ssaniu [m]

$\Delta h_{st}$  - straty energii na tłoczeniu [m]

Wiedząc że strumień przepływający przez pompę odpowiada strumieniowi przepływającemu przez rurociąg  $\dot{V} = \dot{V}_{ukł}$  (to samo dotyczy  $\rho$  i  $g$ ) z powyższego układu równań wynika, że  $H_u = H_{ukł}$  czyli, że punkt na charakterystyce pompy pokrywa się z punktem na charakterystyce rurociągu. Inaczej można powiedzieć, że miejsce przecięcia charakterystyki pompy z charakterystyką rurociągu to punkt pracy. Prawidłowy dobór pompy polega na dokładnym obliczeniu i narysowaniu charakterystyki instalacji (rurociągu) a następnie na znalezieniu takiej pompy, której charakterystyka przetnie się z charakterystyką sieci w zakresie optymalnej sprawności ( $0,8 \eta_{max}$ ). Można również obliczyć  $H_{ukł}$  i dobrać pompę o tej samej wartości  $H_u$  uwzględniając oczywiście optymalny zakres sprawności. Pomimo tego, że powyższe stwierdzenie powinno być oczywiste dla każdego inżyniera mechanika, w praktyce wiele pomp dobranych jest nieprawidłowo, na skutek czego pracują one ze sprawnością znacznie niższą niż jest możliwa do uzyskania.

**UWAGA.** Do wykreślenia odpowiedniej charakterystyki, wymagane jest wykonanie dziewięciu punktów pomiarowych. Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia.
2. Schemat stanowiska.
3. Przykładowe obliczenia dla jednego dowolnie wybranego punktu pracy pompy.
4. Tabele z wielkościami zmierzonymi oraz obliczonymi.
5. Zależności składające się na charakterystykę pompy tj.  $H_u = f(\dot{V})$ ,  $N_u = f(\dot{V})$ ,  $\eta = (\dot{V})$  wraz z oznaczonym optymalnym punktem pracy oraz zakresem pracy  $\eta=0,8\eta_{\max}$
6. Rozkład ciśnień po stronie ssącej oraz tłocznej.
7. Wnioski

## TABELE

Wielkości zmierzone

Lp.	$P_{ps}$ [MPa]	$P_{nt}$ [MPa]	$N_{el}$ [kW]	$\Delta H$ [mmHg]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Wielkości obliczone

Lp.	$P_{ps}$ [Pa]	$P_{nt}$ [Pa]	$V$ [m <sup>3</sup> /h]	$V$ [m <sup>3</sup> /s]	$H_u$ [m]	$N_u$ [W]	$\eta$ [%]
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

## Literatura

1. Instrukcja – Badanie pompy. Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych AGH.
2. Bergander M.J. Fluid Mechanics Vol. 2., Kraków 2011.
3. Jędrał W. Pompy wirowe., Warszawa 2001.
4. Łazarkiewicz Sz. Pompy wirowe.
5. Troskoleński A.T. Pompy wirowe.

Opracował: **Wojciech Knapczyk**  
**Krzysztof Szopa**