

Ćwiczenie nr 5:

Współpraca pompy z układem przewodów.

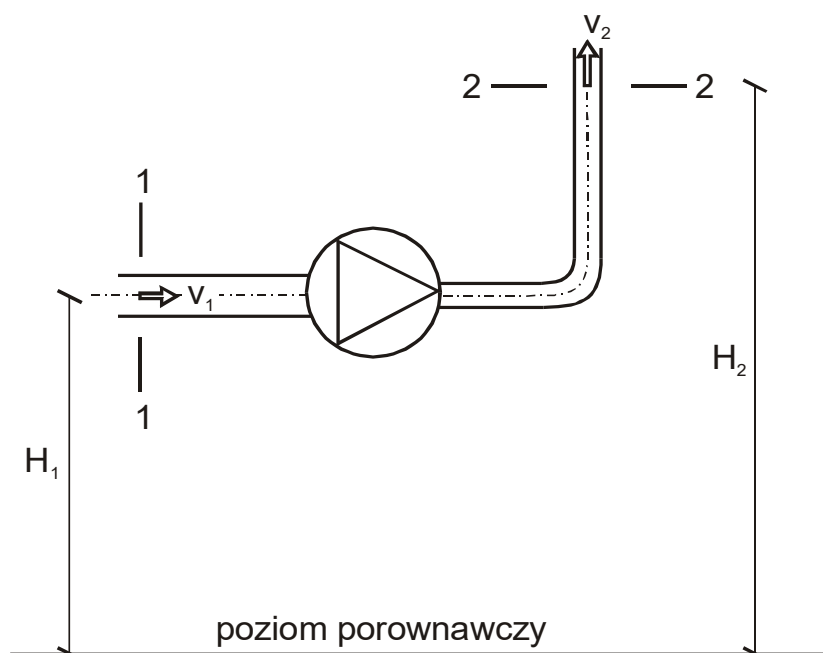
Celem ćwiczenia jest sporządzenie charakterystyki pojedynczej pompy wirowej współpracującej z układem przewodów, przy różnych prędkościach obrotowych.

1. Wprowadzenie

1.1. Pompa w układzie przewodów

Pompa jest maszyną przepływową, umożliwiającą dostarczenie przepływającemu przez nią strumieniowi cieczy energii mechanicznej. Stosowana jest przede wszystkim w celu przemieszczenia cieczy wzdłuż przewodu lub podniesienia jej na pewną wysokość. Najczęściej stosowane są pompy wirowe, które ze względu na kierunek wypływu cieczy można podzielić na odśrodkowe, diagonalne i helikoidalne oraz śmigłowe.

W przypadku, gdy pompa znajduje się w układzie przewodów, jeśli porównujemy wysokości energii przekrojów przed i za pompą używając równania *Bernoulliego* należy uwzględnić wysokość energii dostarczanej cieczy przez pompę H_{uk} , Rys. 1.



Rys. 1. Pompa w układzie przewodów

Można zapisać następujące równanie:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + H_1 + H_{uk} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + H_2 + \Delta h_{1-2} \quad (1)$$

gdzie:

p - ciśnienie w osi przewodu w przekroju porównawczym; [Pa],

γ - ciężar właściwy cieczy; [N/m³],

α - współczynnik bezwładności cieczy, wg PN-76/M-34034¹,

dla przepływu burzliwego $\alpha = 1$; [-],

v - średnia prędkość przepływu w przewodzie w rozpatrywanym przekroju; [m/s],

g - przyspieszenie ziemskie; 9,81 [m/s²],

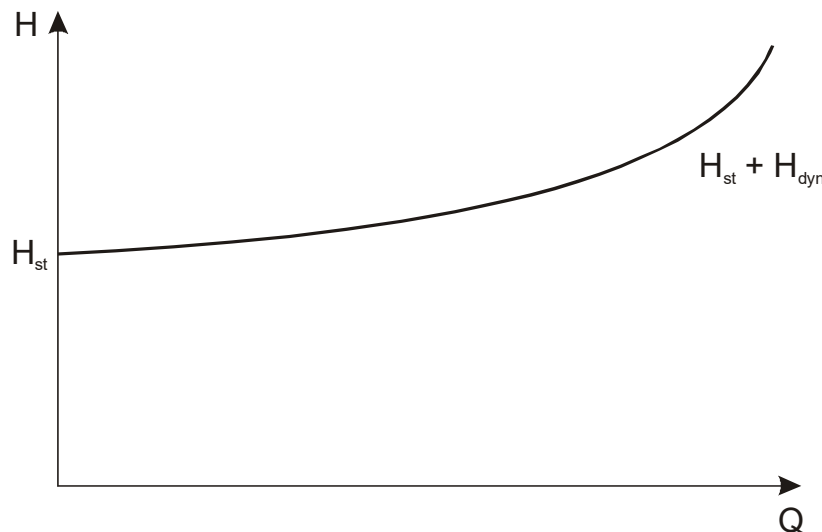
H - wysokość osi przewodu względem przyjętego poziomu odniesienia; [m],

Δh_{1-2} - wysokość strat hydraulicznych pomiędzy rozpatrywanymi przekrojami; [m].

Wysokość ta wg PN-81/M-44001² i nosi nazwę wysokości podnoszenia układu pompowego i jest to wysokość energii wymagana przez układ, w którym umieszczona jest pompa, do przetłoczenia cieczy od przekroju 1-1 do przekroju 2-2 z wydajnością Q [m³/s]. Równanie (1) można przekształcić do postaci:

$$H_{uk} = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (H_2 - H_1) + \frac{\alpha v_2^2 - \alpha v_1^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (2)$$

Które przedstawia ogólną postać równania do obliczeń H_{uk} . Z równania tego wynika, że wysokość ta jest niezbędna do pokonania różnicy wysokości ciśnień, różnicy wysokości prędkości, różnicy wysokości geometrycznej i wysokości strat hydraulicznych pomiędzy rozpatrywanymi przekrojami. Dwa ostatnie składniki prawej strony równania (2) są funkcją wydajności układu i ich suma nazywana jest wysokością dynamiczną H_{dyn} , natomiast suma dwóch pierwszych składników prawej strony równania nazywana jest wysokością statyczną układu pompowego H_{st} . Graficznie wysokość podnoszenia układu pompowego H_{uk} można przedstawić jak na Rys. 2.



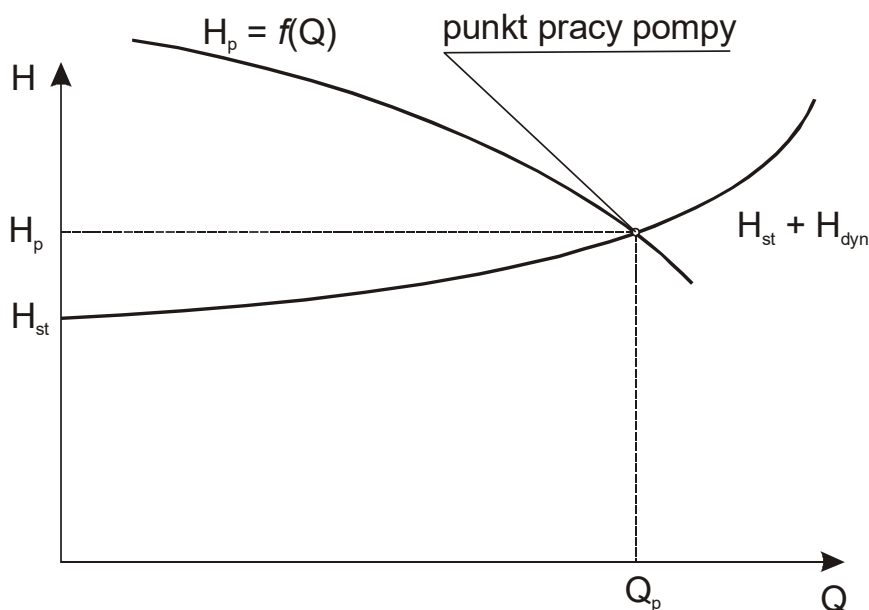
Rys. 2. Graficzny obraz charakterystyki układu pompowego

Pompa, jako konkretne urządzenie posiada własną charakterystykę wydajności podawaną przez producenta, jako zależność jej wysokości podnoszenia od wydajności $H_p = f(Q)$, najczęściej w postaci graficznej (wykres).

Punkt przecięcia charakterystyki układu pompowego i charakterystyki wydajności pompy nosi nazwę **punktu pracy pompy**, jego współrzędne (wysokość podnoszenia i wydajność) przedstawiają rzeczywiste parametry pracy zarówno pompy jak i układu, Rys. 3.

¹ Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia.

² Pompy wirowe i ich układy. Wielkości charakterystyczne. Nazwy, określenia, symbole i jednostki miar.



Rys. 3. Punkt pracy pompy

1.2. Pomiary ciśnienia w układzie

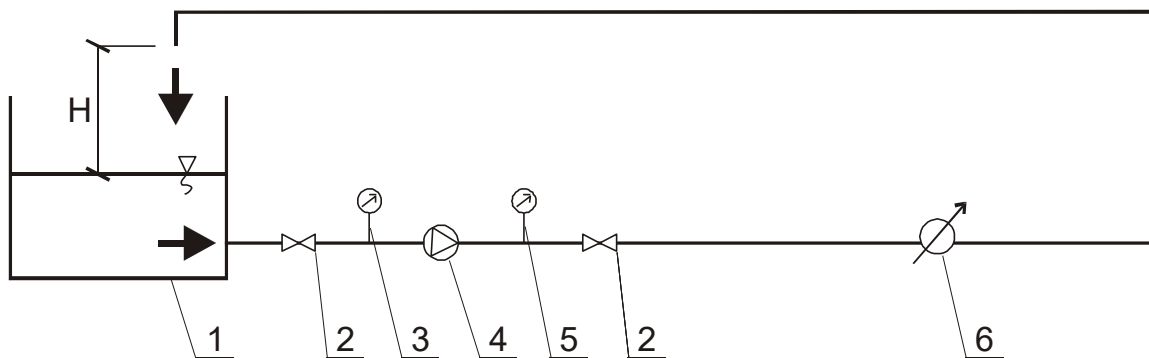
Do równania *Bernoulliego* wpisuje się wartość **ciśnienia bezwzględnego (absolutnego)**. W układzie doświadczalnym pomiar ciśnienia będzie realizowany w dwóch przekrojach – przed i za pompą. W przekroju przed pompą zamontowany jest **wakuometr** - przyrząd do mierzenia ciśnień poniżej ciśnienia atmosferycznego (podciśnienia). W przekroju za pompą zamontowany jest **manometr** - przyrząd do mierzenia ciśnień powyżej ciśnienia atmosferycznego (nadciśnienia). Zatem by określić ciśnienie bezwzględne na podstawie wskazania wakuometru, należy **od ciśnienia atmosferycznego (p_a) odjąć wartość podciśnienia (p_p)**. W przypadku **manometru**, by określić ciśnienie bezwzględne, należy **do wartości ciśnienia atmosferycznego dodać wartość nadciśnienia (p_n)**.

Podstawową jednostką w układzie SI dla ciśnienia jest **Pascal [Pa]**. W praktyce często spotyka się również inne jednostki: atmosfera fizyczna [atm], bar [bar], mega Pascal [MPa], milimetr słupa rtęci [tor], metr słupa wody [m H₂O].

$$1 \text{ bar} = 0,99 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 750 \text{ tor} = 10,19 \text{ m H}_2\text{O}$$

2. Opis stanowiska badawczego

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 4.

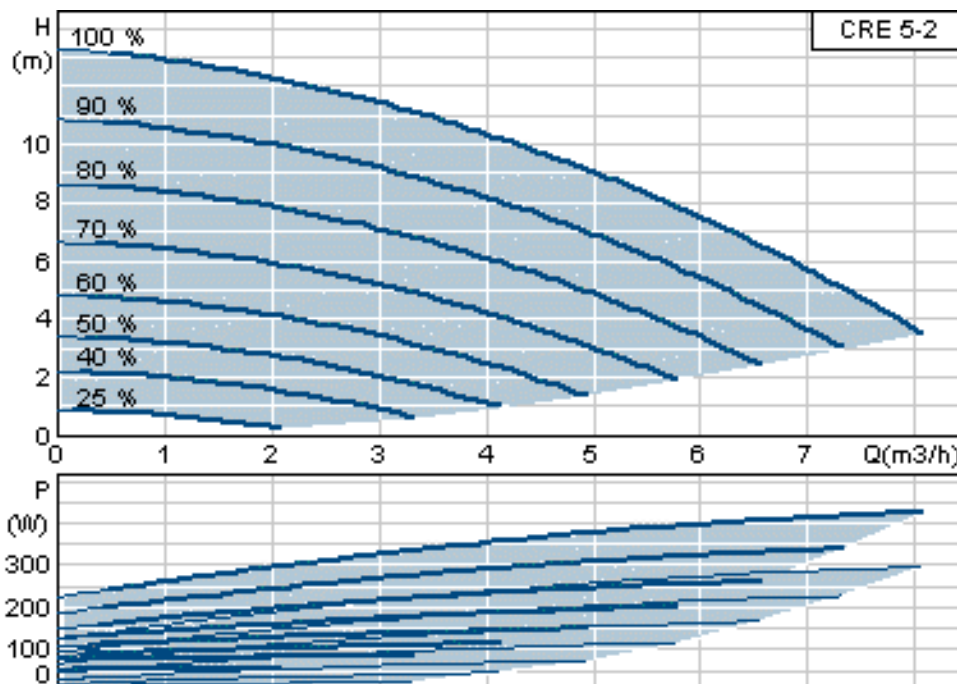


Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

Oznaczenia: 1 – zbiornik, 2 – zawór, 3 – wakuometr, 4 – pompa, 5 – manometr, 6 – miernik natężenia przepływu.

W ćwiczeniu dąży się do sporządzenia charakterystyki pojedynczej pompy pracującej z różną prędkością obrotową. Stanowisko pomiarowe składa się z zamontowanej pompy wirowej, odśrodkowej przeznaczonej do pompowania wody, **Grundfoss CRE 5-2**, cyfra 5 oznacza wydajność nominalną w m³/h, cyfra 2 oznacza liczbę stopni pompy (liczbę wirników). Woda przepływa przez rurociąg w układzie zamkniętym, to znaczy wypływa ze zbiornika do przewodu, przepływa przez układ, a następnie wraca do zbiornika. Za pomocą zamontowanej armatury pomiarowej możliwe jest określenie parametrów przepływu. Wysokość podnoszenia pompy jest równa wysokości zmierzonego ciśnienia za pompą.

Poniższy rysunek przedstawia charakterystykę wydajności pompy (u góry) oraz charakterystykę mocy na wale pompy (u dołu). Charakterystyka wydajności pompy przedstawiona jest w formie tzw. obszaru stosowalności pompy (jasno szara powierzchnia) z 8 wydzielonymi przykładowymi krzywymi, ponieważ zastosowana pompa ma możliwość regulacji pracy w obszarze stosowalności.



Rys. 5. Charakterystyka wydajności pompy (górną) oraz charakterystyka mocy na wale pompy (dół)

Zapisując równanie *Bernoulliego* dla przekrojów - zwierciadła wody w zbiorniku oraz wylotu z przewodu otrzymamy:

$$H_{uk} = H + \frac{v^2}{2g} + \Delta h_{1-2} = H + \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \quad (3)$$

gdzie:

λ - współczynnik strat liniowych (liniowych oporów tarcia); [-],

l - długość przewodu; [m],

d - średnica wewnętrzna przewodu; [m],

ζ - współczynnik strat miejscowych; [-].

Wykorzystując równanie ciągłości i podstawiając w miejsce $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$ otrzymamy:

$$H_{uk} = H + \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4} \left(1 + \lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) = H + A Q^2 \quad (4)$$

Przy danej chwilowej wydajności układu A jest wielkością stałą. Równocześnie współrzędne punktu pracy pompy pozwalają zapisać następujące równanie:

$$H_p = H_{uk} = H + AQ^2 \quad (5)$$

Z którego można wyznaczyć wartość A dla znanej wysokości podnoszenia pompy. W równaniu tym H odpowiada wysokości statycznej układu pompowego H_{st} , natomiast AQ^2 jest wysokością dynamiczną.

Zapisując równanie *Bernoulliego* dla przekrojów przed i za pompą w miejscach, gdzie zamontowane są wakuometr mierzący podciśnienie p_p i manometr wskazujący nadciśnienie p_n otrzymamy:

$$H_p + \frac{p_a - p_p}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_1 = \frac{p_a + p_n}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_2 + \Delta h_{1-2} \quad (6)$$

gdzie:

p_a - jest ciśnieniem atmosferycznym; [Pa].

Rozpatrywane przekroje znajdują się na jednym poziomie, więc $H_1 = H_2$, średnice przewodów w rozpatrywanych przekrojach są jednakowe, dlatego również średnie prędkości przepływu są równe: $v_1 = v_2$. Rozpatrywane przekroje są umiejscowione tuż przed i tuż za pompą, można przyjąć, że wysokość strat pomiędzy nimi $\Delta h_{1-2} \approx 0$. Czyli wysokość podnoszenia pompy będzie równa wysokości różnicy ciśnień w rozpatrywanych przekrojach:

$$H_p = \frac{p_p + p_n}{\gamma} \quad (7)$$

3. Przebieg ćwiczenia

Po włączeniu pompy przez prowadzącego ćwiczenie wykonać pomiar wysokości wylotu przewodu ponad zwierciadłem wody w zbiorniku H_g . Odczytać wskazania wakuometru (p_p) i manometru (p_n), (jeżeli wakuometr wskaże wartość 0 przydławić zawór przed pompą, aż do osiągnięcia mierzalnego podciśnienia w przekroju, w którym umieszczony jest wakuometr). Równocześnie odczytać natężenie przepływu z przepływomierza Q . Określić wysokość podnoszenia pompy H_p wg (7) i wyznaczyć stałą A z równania (5). Z wykresu charakterystyki pompy odczytać wartość mocy pobranej $P_{pobrane}$ i wyznaczyć moc użyteczną $P_{użyte}$ i sprawność pompy η . Następnie dokonać kolejnych pomiarów dla innych wydajności pompy osiąganych poprzez dławienie zaworu za pompą. Nanieść w układzie współrzędnych Q, H otrzymane punkty pracy pompy i połączyć je w charakterystykę wydajności pompy $H_p = f(Q)$. Uzupełnić wykres o charakterystyki układu pompowego $H_{uk} = H + AQ^2$.

W drugiej części ćwiczenia (B) należy ustawić stałą wartość ciśnienia dla pracy pompy. Następnie zwiększać wartość przepływu Q , notując chwilowe wartości obrotów na minutę (n) ora mocy pobieranej przez pompę (P_{Moc}) oraz wartość ciśnienia (P). Pomiarów wykonywać do momentu, aż 3 kolejne wskazania ciśnienia będą poniżej zadanej wartości.

Wszystkie wartości zmierzone wprowadzić do tabeli wyników (Załącznik 1).

4. Sprawozdanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, należy wykonać sprawozdanie wg. wzoru poniżej:

- Przebieg ćwiczenia (krótki, wypunktowany)
- Opis badanych wielkości (zastosowane wzory + objaśnienia)
- Przykład obliczeń (dla każdej z badanych wielkości)
- Wyniki (uzupełniona tabela wyników)
- Wnioski

Załącznik 1. Tabela wyników

A. Wyznaczenie charakterystyki pracy pompy

LP.	H _g	P _p			P _n			Q		A	H _p	P _{pobrane}	P _{użyte}	η
	m	bar	Pa	m	bar	Pa	m	m ³ /h	m ³ /s	s ² /m ⁵	m	W	W	%

$$A = \frac{H_p - H_g}{Q^2} [s^2/m^5]; H_p = \frac{P_p + p_n}{\gamma} \left[\frac{Pa + Pa}{N/3} = m \right];$$

$$P_{uzyt} = H_p \cdot Q \cdot \gamma [W]; \eta = \frac{P_{uzyt}}{P_{pobrane}} \cdot 100 [\%];$$

n_{maks} = 2900 obr./min

