

UNIwersYTET GDAŃSKI
WYDZIAŁ CHEMII
KATEDRA TECHNOLOGII ŚRODOWISKA



Podstawy aparatury chemicznej
Wyznaczenie charakterystyki pracy pompy wirowej

dr inż. Paweł Mazierski
Gdańsk 2024

1. Część teoretyczna

1.1. Informacje ogólne

Przepływ cieczy odgrywa kluczową rolę w procesach technologicznych, takich jak dostarczanie surowców i półproduktów, odbiór produktów końcowych oraz wymuszanie ruchu cieczy w urządzeniach procesowych. Ruch płynów opiera się na zasadach mechaniki, które wymagają znajomości fizycznych właściwości płynu oraz bilansu masy i energii przepływu. Kluczowym równaniem stosowanym w analizie przepływu jest równanie Bernoulliego, które dla płynów rzeczywistych uwzględnia nieodwracalności wynikające z oporów przepływu. Ważne znaczenie ma również równanie oporów Darcy'ego-Weisbacha.

Pompy to urządzenia służące do:

- przenoszenia cieczy z poziomu niższego na poziom wyższy;
- oraz tłoczenia cieczy ze zbiorników o ciśnieniu niższym do przestrzeni o ciśnieniu wyższym.

Zasada ich działania opiera się na **wytworzeniu różnicy ciśnień** pomiędzy **stroną ssawną** (wlotem do pompy) a **stroną tłoczną pompy** (wylotem z pompy). Pompa stanowi urządzenie bierne, które przenosi energię mechaniczną z jakiegokolwiek zewnętrznego źródła energii na ciecz przez nią przepływającą, zatem pompa powoduje wzrost energii przepływającej przez nią cieczy. W zależności od sposobu tłoczenia cieczy z poziomu niskiego ciśnienia do przestrzeni tłoczenia wyróżniamy pompy:

- **wyporowe;**
- **wirowe;**
- oraz **strumieniowe.**

W pompach wirowych głównym elementem roboczym jest wirnik, który zanurza się w cieczy umieszczonej w korpusie pompy. Wirnik wywiera nacisk na ciecz, jednocześnie wprawiając ją w ruch obrotowy. Dzięki temu ciecz zyskuje energię kinetyczną, która na wylocie z pompy, przekształca się w energię ciśnienia. Przepływ cieczy w pompach wirowych może być różnego rodzaju – promieniowy, osiowy lub mieszany. Stąd też wyróżnia się pompy wirowe odśrodkowe, diagonalne i osiowe. W pompach diagonalnych ciecz wpływa do wirnika w sposób osiowy, jednak wypływa pod pewnym kątem. Z kolei w pompach osiowych przepływ cieczy odbywa się równolegle do osi wirnika. Ilość energii przekazywanej cieczy zależy od prędkości obrotowej wirnika. W przeciwieństwie do pomp wyporowych, dławienie

przepływu nie prowadzi do gwałtownego wzrostu ciśnienia, a pompy wirowe cechują się znacznie wyższą wydajnością w porównaniu do pomp wyporowych.

W pompach wyporowych ciecz zamknięta w korpusie jest poddawana naciskowi przez element roboczy, taki jak tłok lub rotor, co powoduje wzrost jej energii ciśnienia, która jest następnie wykorzystywana podczas przepływu. Ten sposób przekazywania energii wymaga oddzielenia komory ssawnej od tłocznej, co realizuje się za pomocą co najmniej jednej pary zaworów: ssawnego i tłocznego, lub poprzez specjalną konstrukcję tłoka-rotora w pompach rotacyjnych. Ciśnienie generowane przez pompy wyporowe może teoretycznie być nieograniczone, dlatego możliwe jest dławienie przepływu w ograniczonym zakresie. Pompy wyporowe można podzielić na **tłokowe**, w których tłok, nurnik lub membrana wykonują **ruch posuwisto-zwrotny**, oraz na **pompy rotacyjne**. **Pompy perystaltyczne** także należą do pomp wyporowych. W tego typu pompach ciecz jest transportowana porcjami z komory ssawnej do tłocznej poprzez ściskanie elastycznego przewodu, które odbywa się między dwoma obracającymi się rolkami a półcylicylniczną bieżnią koła.

Wydajność pomp wyporowych (V) jest uzależniona od rodzaju elementu roboczego, jego kształtu, objętości przetłaczanej cieczy (V_1) oraz liczby suwów tłoka lub obrotów rotora w jednostce czasu (t). Można to wyrazić wzorem:

$$V = V_1 \cdot \varphi \cdot t \text{ [m}^3/\text{h]}$$

gdzie:

- φ to współczynnik sprawności objętościowej pompy - 0,75-0,98.

Wydajność można regulować poprzez zmianę długości skoku, liczbę suwów tłoka lub obrotów rotora, a także przez recyrkulację części cieczy z powrotem do komory ssawnej.

Zużycie mocy (N), które jest energią dostarczaną do cieczy w celu jej przepływu, oblicza się według wzoru:

$$N = H_u \cdot V \cdot \rho \cdot g \text{ [W]}$$

gdzie:

- H_u to wysokość użytecznego podnoszenia,
- ρ to gęstość cieczy,
- g to przyspieszenie ziemskie.

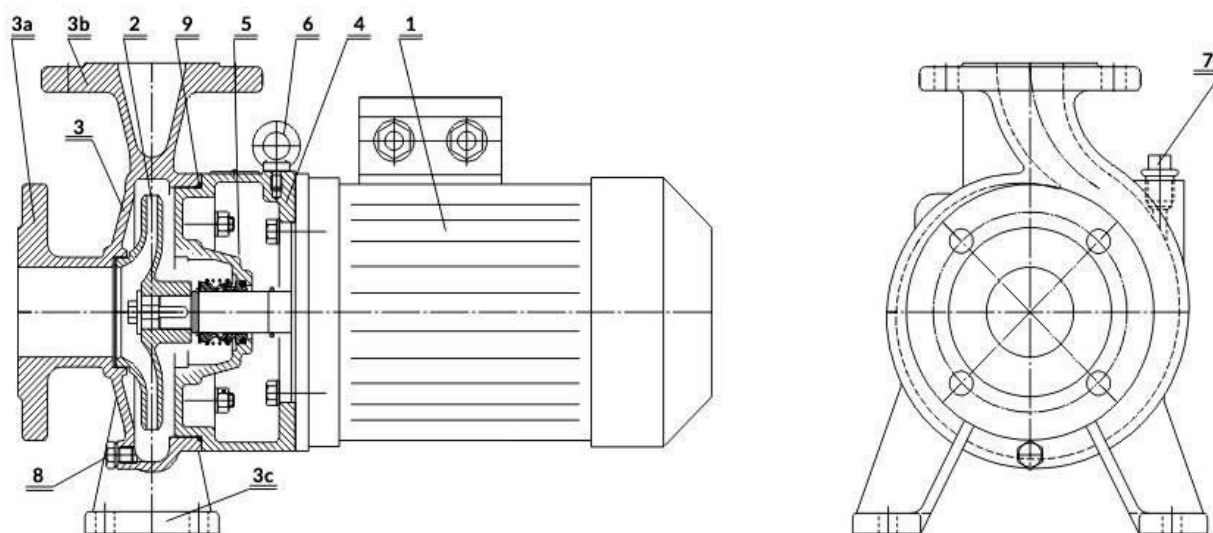
Podczas obliczania rzeczywistego zapotrzebowania na moc, należy dodatkowo uwzględnić sprawność pompy, która wynosi od 0,7 do 0,95, oraz sprawność układu napędowego.

W **pompach strumieniowych** zjawisko Venturiego jest wykorzystywane do przemieszczania

cieczy, zarówno podczas ssania, jak i tłoczenia. W wyniku zmiany przekroju przepływu następuje przekształcenie energii ciśnienia płynu w energię kinetyczną (lub odwrotnie). Jako płyny robocze najczęściej wykorzystuje się wodę, parę wodną, powietrze lub inne substancje.

1.2. Budowa pomp wirowych

Część ruchoma w postaci wirnika (np. łopatkowego) osadzonego na wale wprowadzonym w ruch obrotowy znajduje się w korpusie pompy. Napęd stanowi silnik z wydłużonym wałem (zazwyczaj wykonanym ze stali nierdzewnej), który w pokrywie uszczelniony jest uszczelnieniem czołowym. Budowa jako przekrój poprzeczny oraz widok z przodu typowej pompy wirowej (poziomej) została przedstawiona na Rysunku 1. Oprócz wspomnianych elementów pompa musi posiadać króćce przyłączeniowe: tzw. króciec ssawny oraz tłoczny.



Rysunek 1. Budowa pompy wirowej: (1) silnik elektryczny, (2) wirnik pompy, (3) korpus pompy, (3a) kołnierz ssawny, (3b) kołnierz tłoczny, (3c) łapa, (4) łącznik, (5) uszczelnienie, (6) śruba z uchem, (7) otwór z korkiem, (8) korek spustowy i (10) pierścień uszczelniający

Ruch cieczy przepływającej przez pompę jest przyspieszany przez wirnik co generuje spadek ciśnienia na wlocie wirnika, następstwem czego jest zasysanie cieczy do wnętrza pompy. Wzrost energii kinetycznej cieczy powoduje częściowo pojawienie się energii ciśnienia (w wyniku przyspieszenia ruchu cieczy za pomocą wirnika), co umożliwia przenoszenie cieczy z wnętrza pompy do przewodu tłocznego.

1.3. Zasada działania pomp wirowych

Obracający się wirnik dzięki odpowiednio ukształtowanym łopatką wprowadza w ruch cząsteczki cieczy 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. W pracy pomp wirowych wyróżnić można 5 najważniejszych etapów:

- **dopływ cieczy do wirnika:** ciecz wchodzi do pompy osiowo przez wlot, kierując się bezpośrednio do wirnika. Wirnik jest umieszczony wewnątrz obudowy pompy i porusza się z dużą prędkością obrotową;
- **obrót wirnika:** wirnik, napędzany silnikiem, posiada łopatki, które wprawiają ciecz w ruch obrotowy. W wyniku działania siły odśrodkowej ciecz jest wypychana na zewnątrz, od centrum wirnika w kierunku krawędzi obudowy;
- **zwiększenie energii kinetycznej:** obrót wirnika nadaje cieczy energię kinetyczną. Prędkość cieczy rośnie, gdy przepływa ona przez łopatki wirnika;
- **przekształcenie energii kinetycznej w ciśnienie:** po opuszczeniu wirnika ciecz trafia do dyfuzora (rozszerzającej się części wylotowej pompy). W dyfuzorze następuje spowolnienie przepływu cieczy, co skutkuje przekształceniem energii kinetycznej w energię ciśnienia;
- **odpływ cieczy:** Ciecz o zwiększonym ciśnieniu wypływa z pompy przez wylot, gotowa do dalszego transportu w systemie hydraulicznym.

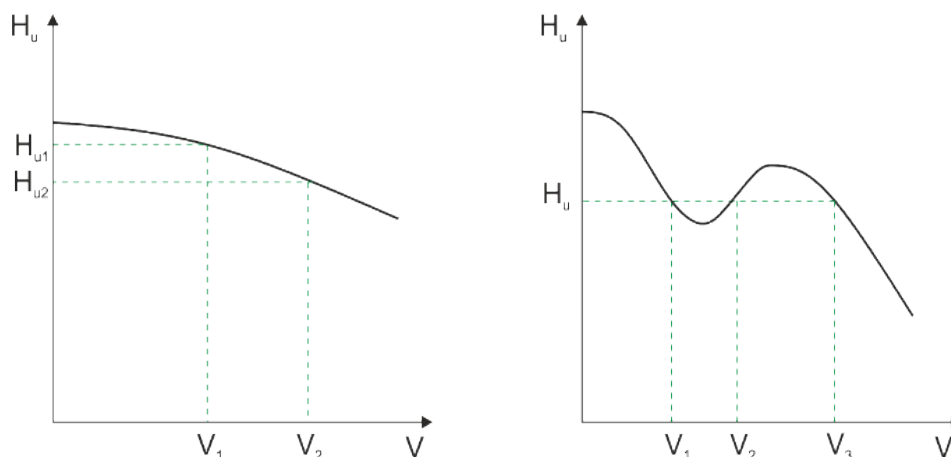
1.4. Charakterystyka pomp

Do najważniejszych parametrów pracy pomp zaliczane są:

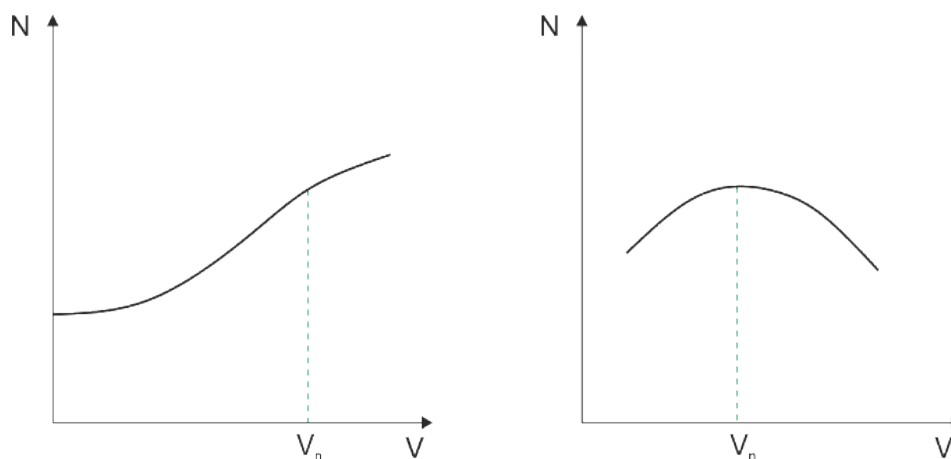
- wysokość podnoszenia cieczy (H_u);
- moc (N);
- oraz sprawność (η).

Zatem, charakterystyka pompy to zależność jednego z powyższych parametrów pracy od parametru podstawowego – wydajności. Przykładowe charakterystyki pracy pomp przedstawiono na Rysunku 2.

Charakterystyka przepływu $H_u = f(V)$



Charakterystyka mocy $N = f(V)$



Rysunek 2. Przykładowe charakterystyki pracy pompy

Rozróżniamy trzy podstawowe charakterystyki pracy pompy:

1. **Charakterystyka przepływu $H_u = f(V)$** – przedstawia zmianę użytecznej wysokości podnoszenia H_u od wydajności V . Jest to główna charakterystyka pracy pompy, często nazywana krzywą dławienia;
2. **Charakterystyka mocy $N = f(V)$** – odniesiona do wału, za pomocą którego silnik przekazuje moc na pompę;
3. **Charakterystyka sprawności $\eta = f(V)$** – 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 (np. m, W, m^3/s);

- bezwymiarowe - parametry pracy odniesione są do wielkości nominalnych, lub optymalnych.

W zależności od kształtu charakterystyki mogą być:

- stateczne, niestateczne;
- przeciążalne, nieprzeciążane (dot. krzywych mocy);
- strome, płaskie (dot. krzywych przepływu).

Pompy wirowe dostosowują się do warunków układu pompowego (instalacji), tj. pracują w środowisku ze zmiennymi parametrami. Pomiedzy parametrami pracy pomp i układu istnieje zależność, tzw. punkt pracy, który, aby wyznaczyć musimy znać charakterystykę przepływu pompy jak i charakterystykę układu pompowego (instalacji). Charakterystyka instalacji obejmuje np. średnica i długość rurociągu tłocznego i ssawnego, wysokość ssania i tłoczenia.

1.5. Regulacja parametrów pracy pomp

Regulację parametrów pracy pomp stosuje się w celu dostosowania pompy do zmieniających się (lub zmiennych) warunków układu pompowego (instalacji pompowej). Bardzo często pompy posiadają zdolność samoregulacji tj., zmiana parametrów pracy pomp w układzie pompowym zachodzi samoczynnie (np. zmiana poziomu cieczy w zbiorniku dolnym i górnym). W pozostałych przypadkach zmiany wartości parametrów pracy pompy należy zastosować jeden ze znanych sposobów regulacji.

Rozpowszechnionych jest kilka sposobów regulacji pomp, odpowiednich dla wielkości i rodzajów pomp. Sposoby regulacji można podzielić na dwie grupy: przy stałej i przy zmiennej prędkości obrotowej (lub przy zmiennej częstotliwości czy liczbie cykli) organu roboczego pompy. Dobór odpowiedniego sposobu regulacji pracy pomp będzie wpływał na stabilność pracy oraz sprawność pompy. Parametry pracy pomp mogą być regulowane trwale lub okresowo.

1.5.1. Sposoby regulacji parametrów pracy pomp wyporowych

Pompy wyporowe nie posiadają zdolności do samoregulacji (np. przy zmianie wysokości podnoszenia cieczy, wynikającej ze zmiany warunków pracy układu pompowego, zmiana statycznej wysokości podnoszenia, zmiana oporów przepływu oraz wydajność pompy pozostaje prawie niezmienna). W tym przypadku metody te ograniczają się do regulacji wydajności pomp wyporowych. Rozróżnia się następujące sposoby regulacji parametrów pracy pomp wyporowych:

- *regulacja parametrów przez zmianę prędkości obrotowej lub liczby pełnych cykli w jednostce czasu* – stosowana najczęściej we wszystkich rodzajach pomp wyporowych. Ten typ regulacji wpływa bezpośrednio na wydajność pompy. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej rośnie liczba cykli pracy (np. suwów tłoka lub obrotów rotora), co zwiększa ilość przepompowanej cieczy. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie **przebiegów częstotliwości** (falowników), które regulują prędkość silnika elektrycznego;
- *regulacja parametrów przez zmianę długości skoku* – ma zastosowanie w pompach o postępowo-zwrotnym ruchu organu roboczego, zwłaszcza w pompach wielotłoczkowych i dozujących. Regulacja skoku tłoka lub rotora pozwala zmieniać objętość cieczy przetwarzanej w jednym cyklu pracy. Skrócenie skoku zmniejsza ilość cieczy przetwarzanej w każdym suwie, co obniża wydajność;
- *regulacja upustowa* – polega na odprowadzeniu części cieczy z obszaru tłocznego do obszaru ssawnego pompy lub zbiornika dolnego, sposób nieekonomiczny powodujący duże straty przy przetwarzaniu cieczy, aczkolwiek jest to jedyny możliwy sposób regulacji parametrów pracy pomp wyporowych o niezmiennym ruchu organu roboczego.

Powyższe metody pozwalają na precyzyjne dostosowanie wydajności i ciśnienia w pompach wyporowych, co jest istotne w wielu zastosowaniach przemysłowych.

1.5.2. Sposoby regulacji parametrów pracy pomp wirowych

Pompy wirowe cechują się zdolnością do regulacji, np. przez zmianę warunków pracy w układzie pompowym (np. podniesienie się poziomu cieczy w zbiorniku górnym), samoczynnie zmienia się wydajność pomp wirowych, zatem pompa wirowa dostosowuje się do zaistniałych warunków pracy. Ta zdolność jest bardzo istotną cechą w eksploatacji tych pomp. Wyróżnia się następujące sposoby regulacji pracy pomp wirowych:

- *regulacja dławieniowa* – polega na zmianie wielkości otwarcia zaworu w części tłocznej pompy, co powoduje zmianę oporów przepływu w układzie i odpowiadająca temu zmiana wysokości podnoszenia pompy, bardzo prosty sposób zmiany wartości parametrów pracy pompy;
- *regulacja przez nastawienie łopatek kierownicy wlotowej* – stosowana w pompach diagonalnych i śmigłowych o dużej wydajności, zmiana kąta ustawienia łopatek powoduje zmianę kierunku i wartości prędkości cieczy dopływającej do wirnika, co

objawia się zmianą dwóch parametrów: wydajności i wysokości podnoszenia;

- *regulacja przez nastawienie łopatek wirnika* – ten typ regulacji znalazł zastosowanie w pompach o dużej wydajności, a zwłaszcza w pompach śmigłowych i niektórych typach pomp diagonalnych, odpowiednie wartości paramentów pracy uzyskuje się przez ręczną lub automatyczną zmianę kąta nastawienia obrotowo osadzonych łopatek wirnika, regulacja ta umożliwia zmniejszenie wydajności pompy praktycznie bez zmiany wysokości podnoszenia i sprawności;
- *regulacja przez zmiany konstrukcyjne wirnika* – w praktyce oznacza zmniejszenie średnicy zewnętrznej wirnika (lub wirników dla pomp wielostopniowych), co wywołuje zmianę prędkości obwodowej wirnika, zmianę kąta wlotowego łopatki oraz szerokości, długości i stopnia pokrycia łopatek;
- *regulacja przez zmianę prędkości obrotowej wirnika* – najbardziej sprawny sposób dostosowania pompy do zmieniających się warunków pracy układu pompowego, zmiana prędkości obrotowej wirnika powoduje zmianę wartości trzech podstawowych parametrów pracy pomp: wydajności, wysokości podnoszenia i mocy.

1.6. Porównanie (wady i zalety) pomp wyporowych i wirowych

Charakterystyka pomp wirowych obejmuje następujące:

zalety:

- wysoka wydajność;
- kompaktowe rozmiary dzięki wysokim prędkościom obrotowym;
- możliwość bezpośredniego połączenia z silnikami o wysokiej prędkości obrotowej;
- wysoka niezawodność;
- zdolność do automatycznego dostosowywania się do zmieniających się warunków pracy (zmiana punktu pracy);
- stabilność i ciągłość działania (stały przepływ, brak zaworów, jednoczesne zasysanie i tłoczenie).

wady:

- ograniczona wysokość podnoszenia;
- brak zdolności do samozasysania – konieczność napełnienia układu przed uruchomieniem (z wyjątkiem pomp krążeniowych samozasysających);
- wrażliwość na obecność gazów w cieczy, co może prowadzić do przerwania przepływu;
- niższa sprawność w porównaniu do pomp wyporowych.

Charakterystyka pomp wirowych obejmuje następujące:

zalety:

- bardzo duża wysokość podnoszenia;
- stała wydajność, nawet przy zmieniających się warunkach pracy;
- wysoka sprawność, szczególnie w przypadku pomp nurnikowych;
- zdolność do samozasysania podczas uruchamiania systemu;
- niska wrażliwość na obecność gazów w pompowanej cieczy.

wady:

- niska wydajność;
- nierównomierne parametry pracy w pompach z posuwisto-zwrotnym ruchem elementu roboczego;
- wyższa awaryjność wynikająca z rozbudowanych mechanizmów ruchomych (np. układu korbowego, systemu sterowania zaworami) oraz problemów ze szczelnością między przemieszczającymi się elementami.

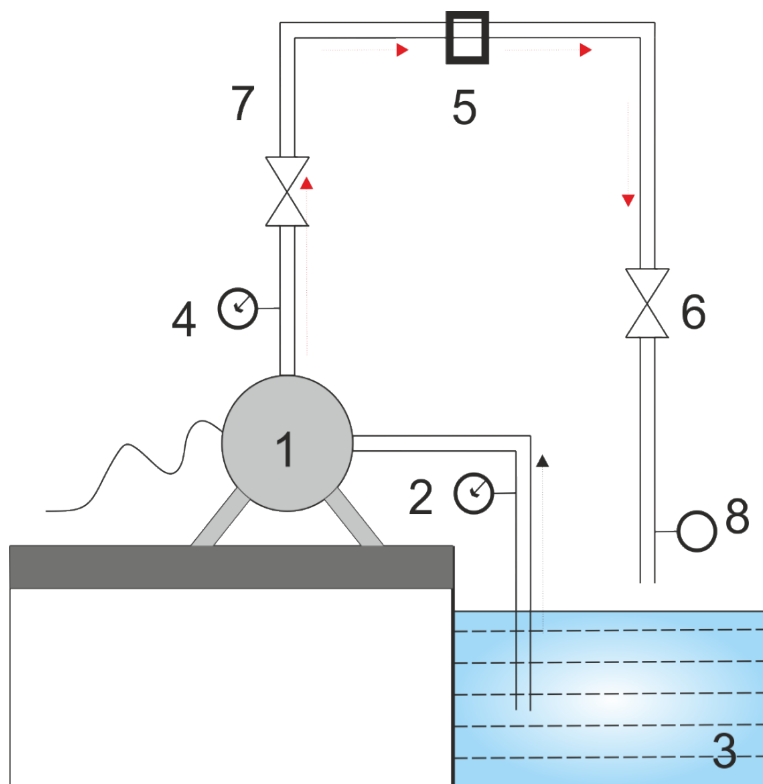
2. Literatura

1. Błasiński H., Młodziński B., Aparatura przemysłu chemicznego, WNT 1983.
2. Bieszk H., Urządzenia do realizacji procesów cieplnych w technologii chemicznej, Wyd. PG. 2010.
3. Bieszk H., Urządzenia do realizacji procesów mechanicznych w technologii chemicznej, Wyd. PG. 2001.
4. Pikoń J., Aparatura chemiczna, PWN 1978.
5. Warych J., Aparatura Chemiczna i Procesowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.

3. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania pomp wirowych (w tym układu hydraulicznego wraz z jego osprzętem, schematycznie pokazanym na Rysunku 3), przedstawienie metodyki pomiarów i obliczeń charakterystyki pomp wraz ze sporządzeniem jej zakresu pracy. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń należy wyznaczyć zależności:

1. charakterystyka przepływu $H_u = f(V)$
2. charakterystyka mocy $N = f(V)$
3. charakterystyka sprawności $\eta = f(V)$



Rysunek 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego: (1) badana pompa, (2) wakuometr, (3) zbiornik cieczy, (4) manometr, (5) kryza pomiarowa, (6) zawór dławiący, (7) rurociąg oraz (8) wodomierz

4. Wykonanie ćwiczenia

4.1. Wyznaczenie zależności: $H_u = f(V)$, $N = f(V)$, $\eta = f(V)$

Aby wyznaczyć krzywe $H_u = f(V)$, $N = f(V)$, $\eta = f(V)$ należy zapoznać się ze stanowiskiem pomiarowym (schematycznie przedstawionym na Rysunku 3), wielkościami fizycznymi potrzebnymi do ich obliczenia oraz postępować zgodnie ze wskazówkami prowadzącego. Do wyznaczenia krzywych $H_u = f(V)$, $N = f(V)$, $\eta = f(V)$ należy wykonać następujące obliczenia:

- obliczenia strumienia przepływu;
- obliczenia użytecznej wysokości podnoszenia pompy H_u ;
- obliczenie mocy użytecznej;
- obliczenia sprawności ogólnej pompy.

Do wykreślenia odpowiedniej charakterystyki, wymagane jest wykonanie 9 punktów pomiarowych dla obu typów pomp wirowych. Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów należy dokonać pomiarów części ssącej oraz tłocznej instalacji. Sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, schemat stanowiska, opis przeprowadzonych pomiarów/doświadczeń, obliczenia, tabele, wykresy i wnioski.

4.2. Obliczenia

Poniżej przedstawiono podstawowe równania potrzebne do wyznaczenia krzywych $H_u = f(V)$, $N = f(V)$ i $\eta = f(V)$.

- **obliczenia strumienia przepływu – wydajność pompy V**

Znając ilość wody, która przepłynęła przez instalację (odczyt wodomierza przed i po zakończeniu pomiaru) oraz czas, w którym był dokonywany pomiar wyznaczamy strumień przepływu wody przez instalację. Wykonane w ten sposób pomiary porównać z odczytami na kryzach pomiarowych.

- **obliczenia użytecznej wysokości podnoszenia pompy H_u [m]**

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

gdzie:

p_t – ciśnienie za pompą w króćcu tłocznym

p_s – ciśnienie przed pompą w króćcu ssący

e_m – przewyższenie manometryczne

ρ – gęstość czynnika przepływającego przez pompę

g – przyspieszenie ziemskie

c_t, c_s – prędkość w rurociągu tłocznym oraz ssącym

- **obliczenia mocy użyteczna pompy N_u [W]**

$$N_u = V \cdot \rho \cdot g \cdot H_u \text{ [W]}$$

- **obliczenia sprawności ogólnej η_o**

$$\eta_o = \frac{N_u}{N_w} = \frac{N_u}{N_{el} \cdot \eta_{sil}}$$
$$N_u - \text{[W]}$$
$$N_w - \text{[W]}$$

w naszym przypadku $\eta_{sil} = 0,95 - 0,96$.

– WZÓR sprawozdania –

Data.....

Grupa

.....

.....

(Imię i Nazwisko)

Podstawy aparatury chemicznej: Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego

Wyznaczenie charakterystyki pracy pompy wirowej

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia
2. Krótki opis przebiegu doświadczenia
3. Schemat stanowiska pomiarowego
4. Tabele z uzyskanymi danymi
5. Obliczenia
6. Wykresy $Hu = f(V)$, $N = f(V)$ i $\eta = f(V)$
7. Wnioski (omawiające różnice w charakterystyce pracy badanych pomp)

Sposób oceny powyższych elementów sprawozdania:

Oceniany element	Pkt. 1	Pkt. 2	Pkt. 3	Pkt. 4	Pkt. 5	Pkt. 6	Pkt. 7	RAZEM
Ilość punktów do uzyskania	1	3	1	3	5	7	5	25

Łącznie do zdobycia jest 25 pkt, oceniane co 1pkt.

