

# Hydrostatyczne Układy Napędowe

## Laboratorium

Temat:

Eksperymentalne wyznaczenie charakteru oporów  
w przewodach hydraulicznych – opory liniowe

Opracował: Z. Kudźma, P. Osiński, J. Rutański, M. Stosiak

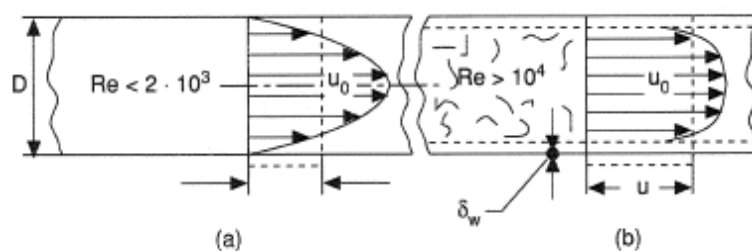
## CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z charakterem strat ciśnienia, występujących przy przepływie cieczy przez prostoliniowe przewody, pomiar wartości tych strat oraz porównanie wyników pomiarów z obliczeniami wg wzorów teoretycznych.

## WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

Zasada pracy napędów hydrostatycznych polega na zmianie energii mechanicznej na hydrauliczną (co odbywa się w pompie), przeniesieniu tej energii (zmagazynowanej w cieczy) przewodami do silnika (siłownika) hydraulicznego, gdzie zachodzi odwrotna zmiana energii hydraulicznej na mechaniczną. Wynika stąd, że nieodłącznym elementem hydraulicznych układów napędowych są przewody, którymi przepływa ciecz, a przepływowi cieczy rzeczywistej towarzyszą zawarte straty energii. Ponieważ straty te wpływają na zmniejszenie sprawności układów hydraulicznych przeto ważną rzeczą jest znajomość przyczyn powstania tych strat, ich wysokości oraz czynników na nie wpływających.

Wartość spadku ciśnienia w przewodach (zwana często stratami liniowymi) zależy od rodzaju przepływu. Na wstępie rozważmy przepływ laminarny występujący w obszarze liczb Reynoldsa  $Re$  mniejszych od wartości krytycznej przyjmowanej zwykle  $Re_{kr} = 2000 \div 2500$ , dla przewodów okrągłych. Rozkład prędkości cieczy w przekroju przewodu jest wówczas paraboliczny (rys. 1a). Warstwy przyścienne pozostają nieruchome, a maksymalna prędkość występuje w osi przewodu. Jak widać z rys. 1a, sąsiednie warstwy cieczy mają różne prędkości bezwzględne, czyli przesuwiają się względem siebie, więc zgodnie z prawem tarcia lepkiego Newtona, takie przesuwanie warstw cieczy względem siebie wymaga pokonania oporu wewnętrznego, proporcjonalnie do współczynnika lepkości dynamicznej cieczy oraz do gradientu prędkości.



Rys. 1. Rozkład prędkości dla przepływu: a – laminarnego i b – turbulentnego.

Pokonanie oporów wewnętrznych w cieczy podczas jej przepływu przez przewód o określonych wymiarach dokonuje się kosztem zasobu energii transportowanej przez ciecz. Innymi słowy, przepływ cieczy lepkiej przez przewód związany jest z rozproszeniem części energii zamienianej wskutek tarcia na ciepło. Można ją wyrazić spadkiem ciśnienia, a więc zmniejszeniem energii potencjalnej zmagazynowanej w jednostce objętości cieczy.

Natężenie przepływu cieczy  $Q$  przy przepływie laminarnym określone jest prawem Hagen-Poiseuille'a.

$$Q = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{128\mu l} d^4 \quad (1)$$

gdzie:

- $p_1, p_2$  – ciśnienia w obu rozpatrywanych przekrojach przewodu,
- $\mu$  – lepkość dynamiczna cieczy,
- $l$  – długość pomiędzy rozpatrywanymi przekrojami (długość przewodu),
- $d$  – średnica wewnętrzna przewodu.

Ze wzoru tego można wyznaczyć spadek ciśnienia w przewodzie o długości  $l$  przy laminarnym przepływie cieczy.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{128\mu Q l}{\pi d^4} \quad (2)$$

W obliczeniach hydraulicznych zwykle się korzysta z wzoru (2) przekształconego do postaci:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (3)$$

gdzie:

- $\rho$  – gęstość cieczy,
- $v$  – średnia prędkość przepływu w przewodzie  $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$ ,
- $\lambda$  – współczynnik oporów przepływu.

Współczynnik oporów przepływu  $\lambda$ , jak to wynika z przekształceń, wynosi:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Natomiast liczbę Reynoldsa wyznacza się z zależności:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (5)$$

gdzie:

- $\nu$  – lepkość kinematyczna cieczy.

W praktyce przyjmuje się dla przewodów sztywnych:

$$\lambda = \frac{75}{Re} \quad (6)$$

Natomiast dla przewodów elastycznych:

$$\lambda = \frac{80 \div 85}{Re} \quad (7)$$

Po przekroczeniu krytycznej wartości liczby  $Re$  przepływ laminarny przechodzi w burzliwy. Rozkład prędkości cieczy wzdłuż średnicy przewodu ma wówczas charakter zbliżony do

„prostokątnego” (rys. 1b) – różniące prędkości sąsiednich warstw cieczy są bardzo niewielkie. Z tego względu wpływ tarcia spowodowanego lepkością cieczy na stratę ciśnienia staje się coraz mniejszy, natomiast rośnie wpływ prędkości, gdyż straty w ruchu turbulentnym związane są głównie ze stratami energii kinetycznej elementów cieczy wymienianych pomiędzy warstwami o różnych prędkościach. Współczynniki oporów przepływu  $\lambda$  dla ruchu burzliwego dają się wyznaczyć empirycznie. Korzystając np. ze wzoru Blasiusa opisującego wartość  $\lambda$  w ruchu burzliwym:

$$\lambda = 0,316Re^{-0,25} \quad (8)$$

Podstawiając powyższą zależność do wzoru (3) można straty ciśnienia wyrazić jako:

$$\Delta p = \left[ 0,316 \left( \frac{vd}{\nu} \right)^{-0,25} \right] \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2$$

$$\Delta p = 0,316 \frac{\rho}{2} \frac{l}{d^{1,25}} v^{0,25} v^{1,75} \quad (9)$$

Widać, że w porównaniu z przepływem laminarnym lepkość występuje w potęgze niższej, a prędkość w potęgze wyższej.

Przy jeszcze większych liczbach  $Re$ , a więc przy przepływie intensywnie turbulentnym wpływ lepkości na straty ciśnienia znika zupełnie, natomiast prędkość cieczy posiada znaczenie decydujące występując w drugiej potęgze.

Oprócz lepkości i prędkości cieczy na wielkość współczynnika  $\lambda$  (a więc i strat ciśnienia) przy przepływie turbulentnym ma wpływ chropowatość wewnętrznej powierzchni przewodów.

Przedstawione wywody można podsumować stwierdzeniem, że w najogólniejszym przypadku straty ciśnienia podczas przepływu cieczy można by przedstawić jako:

$$\Delta p = cv^\alpha \quad (10)$$

gdzie:

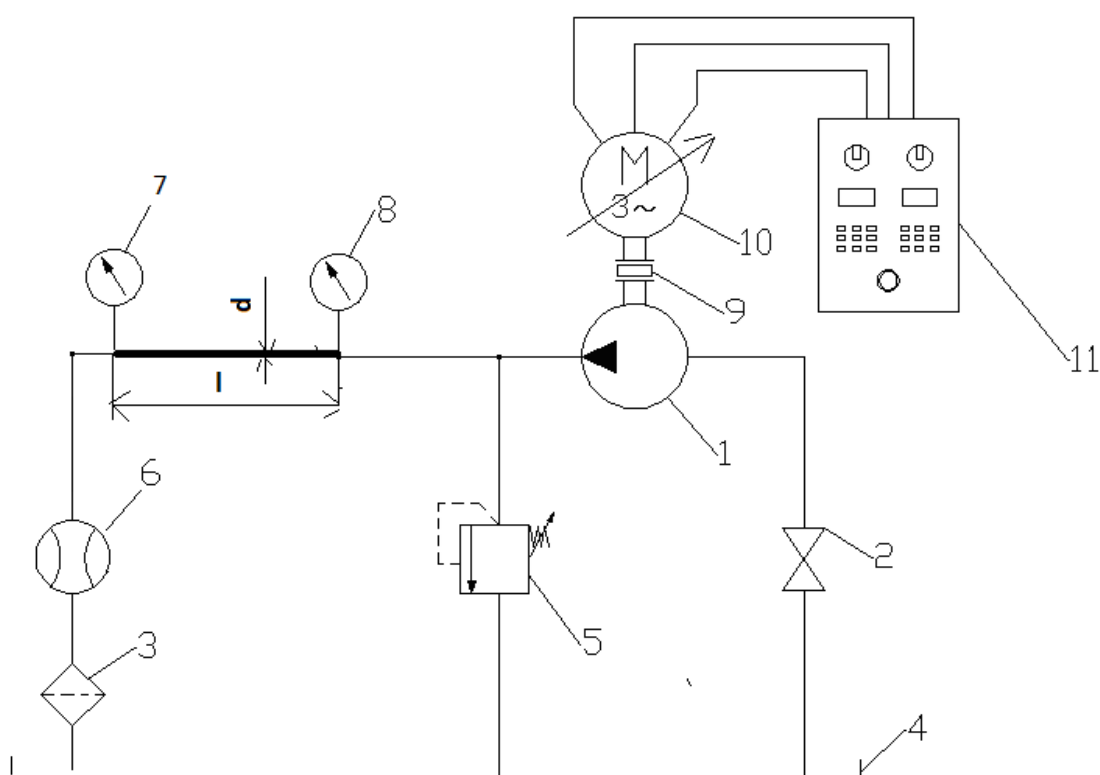
- przy przepływie laminarnym: współczynnik  $c$  jest funkcją, oprócz długości, średnicy przewodu i gęstości cieczy – patrz wzór (3), lepkości  $\nu$ , a wykładnik potęgowej  $\alpha = 1$ ;
- przy przepływie burzliwym o stosunkowo małej intensywności: współczynnik  $c$  jest funkcją lepkości i chropowatości, a wykładnik  $1 < \alpha < 2$ ;
- przy przepływie intensywnie burzliwym: współczynnik  $c$  jest tylko funkcją chropowatości, a wykładnik  $\alpha = 2$

## SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO I SPOSÓB PRZEPROWADZENIA ĆWICZENIA

Schemat układu pomiarowego oraz dane potrzebne do obliczeń przedstawiono na rys. 2. Przeprowadzając ćwiczenie należy poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika elektrycznego zmieniać natężenie przepływu ciecży przez przewód pomiarowy.

Dla określonej nastawy prędkości obrotowej  $n_s$  należy zmierzyć aktualną wartość natężenia przepływu  $Q_{rz}$  za pomocą przepływomierza objętościowego (nr 6 na rys. 2) w którym poprzez pomiar czasu  $t$  napełnienia butli o objętości  $V$  uzyskujemy:

$$Q_{rz} = \frac{V}{t} \quad (11)$$



Rys. 2. Schemat hydrauliczny układu badawczego oporów przepływu ( $l = 2\text{m}$ ,  $d = 4\text{mm}$ ). 1 – pompa zębata, 2 – zawór odcinający, 3 – filtr zlewoy, 4 – zbiornik, 5 – zawór bezpieczeństwa, 6 – przepływomierz, 7, 8 – manometry, 9 – sprzęgło elastyczne, 10 – trójfazowy silnik napędowy z chłodzeniem obcym, 11 – szafa sterownicza

## OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARU

Uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń należy wpisać do tabeli 1:

- rzeczywistą wartość spadku ciśnienia  $\Delta p_{rz}$ ,
- rzeczywiste natężenie przepływu  $Q_{rz}$  na podstawie zmierzonego czasu  $t$  napełnienia określonej objętości  $V$  (przykładowo  $1\text{ dm}^3$ ),

- teoretyczną wartość spadku ciśnienia  $\Delta p_t$  wyznaczoną z wzoru Hagen-Poiseuille'a (2),
- średnią prędkość przepływu cieczy  $v$ ,
- liczbę Reynoldsa  $Re$ ,
- rzeczywista wartość współczynnik oporów przepływu  $\lambda_{rz}$  ze wzoru (3);
- teoretyczną wartość współczynnik oporów przepływu  $\lambda_t$  ze wzoru (6) ;

Otrzymane wyniki należy przedstawić graficznie w postaci wykresów:

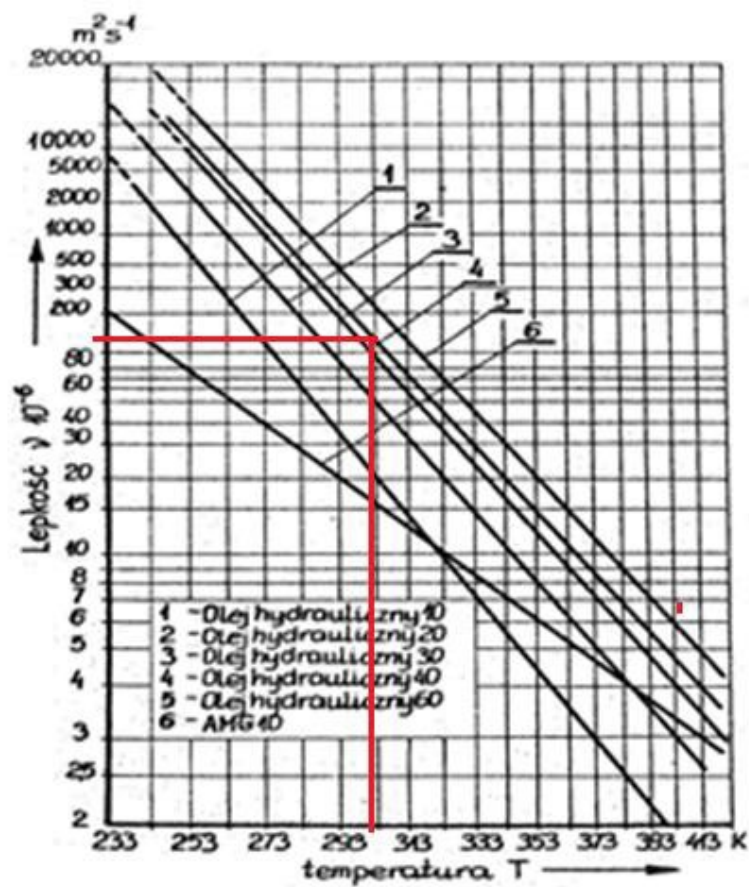
- $\Delta p_{rz}, \Delta p_t = f(Q_{rz})$
- $\lambda_{rz}, \lambda_t = f(Re)$

Sprawozdanie należy zakończyć interpretacją wyników obejmującą min. wyjaśnienie ewentualnych rozbieżności pomiędzy wartościami rzeczywistymi (pochodzącymi z pomiarów) a wartościami teoretycznymi (pochodzącymi z obliczeń).

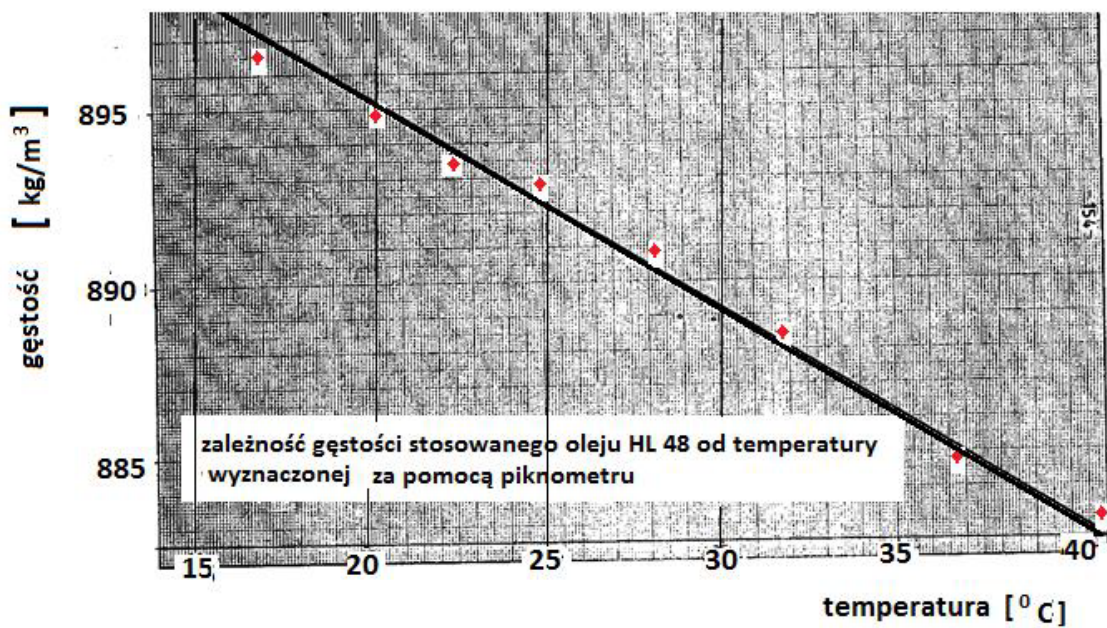
**Tabela 1**

Lp.	$p_1$ [MPa]	$p_2$ [MPa]	$\Delta p_{rz}$ [MPa]	$V$ [dm <sup>3</sup> ]	$t$ [s]	$Q_{rz}$ [ $\frac{dm^3}{min}$ ]	$\Delta p_t$ [MPa]	$v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	$Re$ [-]	$\lambda_{rz}$ [-]	$\lambda_t$ [-]	$\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\nu$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]
												885	$100 \cdot 10^{-6}$

## MATERIAŁY POMOCNICZE



Rys. 3. Zależność lepkości kinematycznej wybranych olejów od temperatury. Lepkość dynamiczna  $\mu = \nu\rho$  [lepkość kinematyczna x gęstość]



Rys. 4. Zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla oleju hydraulicznego HL 48.