



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

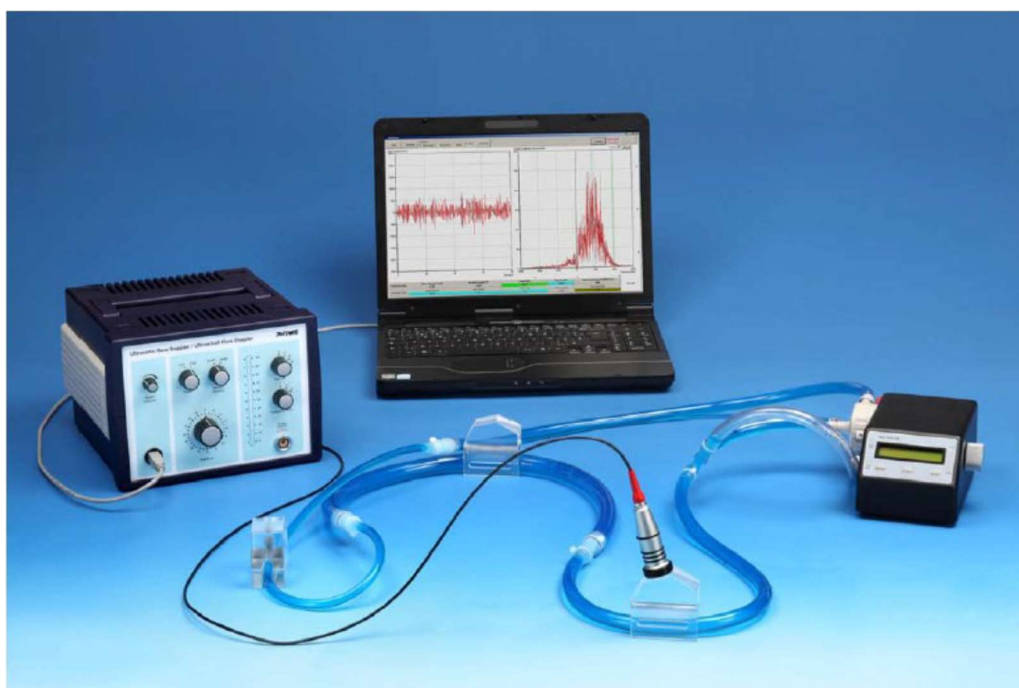
Dofinansowane przez  
Unię Europejską



	Nr projektu	FERS.01.05-IP.08-0335/23
	Tytuł projektu	„STUDENCI HIPOKRATESA- kompleksowy program utworzenia i wdrożenia kierunku lekarskiego na Politechnice Bydgoskiej”
	Beneficjent:	Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

# Ćwiczenie nr 13

## Pomiar przepływu / Ultradźwiękowy efekt Dopplera



**POLITECHNIKA  
BYDGOSKA**  
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich



**POLITECHNIKA  
BYDGOSKA**  
Wydział Technologii  
i Inżynierii Chemicznej



**POLITECHNIKA  
BYDGOSKA**  
Wydział Medyczny

PRACOWNIA BIOFIZYKI



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Dofinansowane przez  
Unię Europejską



## Wstęp

Efekt Dopplera w zakresie ultradźwięków może być wykorzystywany do pomiaru prędkości przepływu. W związku z tym znajduje wiele zastosowań w medycynie do badania wnętrza ciała. To doświadczenie może posłużyć do zdobycia podstawowej wiedzy na temat efektu Dopplera.

Przyczyną efektu Dopplera jest to, że gdy źródło fal porusza się w kierunku obserwatora, każda kolejna grzbiet fali jest emitowana z położenia bliższego obserwatorowi niż grzbiet poprzedniej fali. W rezultacie każda kolejna fala potrzebuje nieco mniej czasu, aby dotrzeć do obserwatora niż fala poprzednia.

Pomiar przepływu może być przeprowadzany przy użyciu różnych procesów i metod. Jedną z prostych, ale skutecznych metod jest pomiar pojemności w litrach. W tym procesie mierzy się, ile czasu zajmuje napełnienie naczynia o znanej objętości (np. dzbanka miarowego). Jeśli podzielisz tę objętość przez czas potrzebny do napełnienia, uzyskasz bezpośrednio prędkość przepływu w l/min lub ml/s.

Wadą tej metody jest to, że nie nadaje się zbyt do ciągłych pomiarów. Może jednak być stosowana w laboratoriach do kalibracji innych metod pomiarowych lub urządzeń.

Pływaki są przykładem mechanicznych mierników przepływu. W pionowej, stożkowej rurze o najszerszej części u góry, pływak jest unoszony do góry przeciwko sile grawitacji dzięki tarcia z cieczą. Prędkość przepływu cieczy maleje w górę, ponieważ przekrój poprzeczny rury zwiększa się. Jeśli siła tarcia i siła grawitacji się równoważą, pływak unosi się. Obrotowe mierniki łopatkowe to kolejny przykład mechanicznych mierników przepływu. W tych miernikach hydrometryczna łopata jest obracana przez napływającą ciecz. Im wyższa prędkość przepływu, tym szybciej obraca się łopata. Obroty te można bardzo dobrze zmierzyć jako częstotliwość za pomocą generatora impulsów, co dostarcza sygnał elektryczny, który można łatwo ocenić.

Obie metody silnie zależą od lepkości cieczy, dlatego muszą być ponownie kalibrowane dla każdej nowej cieczy. Stosowane są nie tylko do pomiaru cieczy, ale także gazów.

Obecnie ultradźwiękowe mierniki przepływu są szeroko stosowane w przemyśle, medycynie i badaniach naukowych. Najczęściej używane są ultradźwiękowe mierniki przepływu, w których pomiar opiera się na czasie przelotu. Wykorzystują one fakt, że fale dźwiękowe są unoszone przez przepływające medium, co powoduje zmianę efektywnej prędkości propagacji dźwięku w zależności od kierunku przepływu. Podobnie jak pływak poruszający się pod prąd, ultradźwięki poruszają się wolniej pod prąd medium niż z prądem.

Najpierw wysyłany jest impuls zgodnie z kierunkiem przepływu i mierzony jest jego czas przelotu  $T_1$ . Następnie mierzony jest czas przelotu  $T_2$  drugiego impulsu, tym razem wysłanego przeciwko kierunkowi przepływu. Określenie różnicy czasów przelotu  $\Delta t$  pozwala



na obliczenie prędkości przepływu  $v$ . Przepływ objętościowy wynika z obliczeń opartych na prędkości przepływu i przekroju poprzecznym rury.

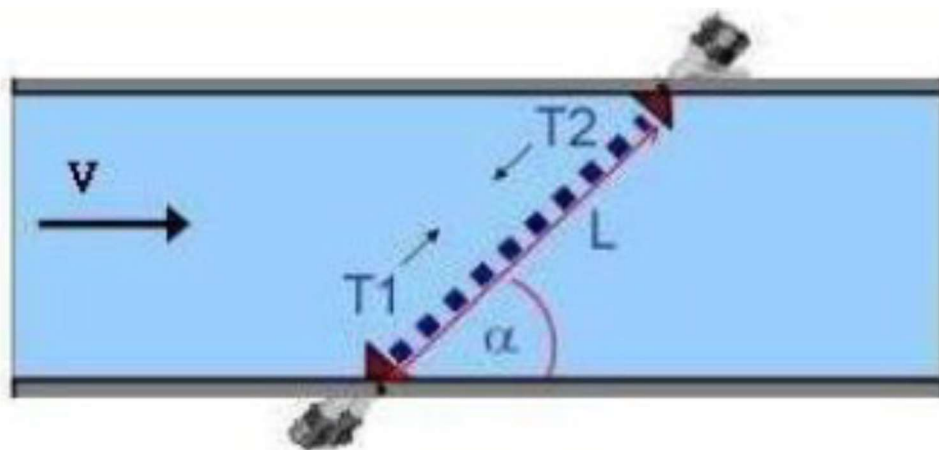
Zakładając, że  $c$  to prędkość dźwięku w medium, obowiązuje następujący wzór:

$$c_1 = c + |\vec{v}| \cos\alpha,$$

$$c_2 = c - |\vec{v}| \cos\alpha,$$

$$\Delta t = T_2 - T_1 = \frac{L|\vec{v}|\cos\alpha}{c^2 - (|\vec{v}|\cos\alpha)^2} \approx \frac{L|\vec{v}|\cos\alpha}{c^2},$$

$L$ ,  $c$  i  $\cos\alpha$  muszą być znane i musi być wzięta pod uwagę zależność temperaturowa prędkości ultradźwięku.



Rysunek 3 Model drogi fali ultradźwiękowej w płynie poruszającym się z prędkością  $v$ .

Zalety tej metody polegają na tym, że pomiary mogą być wykonywane nawet przy dużych przekrojach, nie są wymagane specjalne konstrukcje przekrojowe, a także możliwe są pomiary w połączeniu z cieczami nieprzewodzącymi i zanieczyszczonymi. Jednak generowanie i ocena sygnałów ultradźwiękowych wymagają pewnego nakładu pracy.

W praktyce spotyka się różne układy pomiarowe. Oprócz prostego przesyłu dźwięku na wylot, pomiary mogą być również wykonywane poprzecznie lub w trybie odbicia. Szczególnie wszechstronne są czujniki typu „clamp-on”, które są po prostu zaciskane na rurach i mierzą w trybie odbicia.

Jeśli zastosuje się metodę Dopplera, mierzona jest zmiana częstotliwości, która występuje, gdy fala dźwiękowa jest rozpraszana na małych cząstkach lub zanieczyszczeniach. Kiedy fala ultradźwiękowa o częstotliwości  $f_0$  napotyka poruszający się obiekt, powoduje to przesunięcie częstotliwości ze względu na efekt Dopplera. Dla małej prędkości ruchu prędkość obiektu  $v$  w porównaniu z prędkością dźwięku  $c$  w medium obowiązuje następujący wzór

$$\Delta f = f_0 \frac{v}{c} (\cos\alpha + \cos\beta), \quad (1)$$



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Dofinansowane przez  
Unię Europejską



Kąty  $\alpha$  i  $\beta$  to kąty między prędkością  $v$  a normalną falą dźwiękową. W przypadku systemu impulsowo-odbiciowego z nadajnikiem ultradźwięków, efekt Dopplera zachodzi w wyniku odbicia fali od poruszających się struktur, więc

$$\Delta f = 2f_0 \frac{v}{c} \cos\alpha. \quad (2)$$

Efekt Dopplera jest wykorzystywany w diagnostyce medycznej do badania ruchów i struktur w ruchu, takich jak przepływ krwi w naczyniach. Wyróżnia się dwie główne metody: metodę ciągłofalową (CW, continuous wave) oraz metodę impulsową (pulsed-wave Doppler).

- Metoda CW wykorzystuje ciągłą emisję fali ultradźwiękowej i jest stosunkowo prosta, ale pozwala jedynie wykrywać ruchy bez określenia precyzyjnych szczegółów dotyczących ich lokalizacji.
- Metoda impulsowa (pulsed-wave Doppler), dzięki impulsowej emisji fal, pozwala uzyskać bardziej zróżnicowane i precyzyjne wyniki. Dzięki tej metodzie możliwe jest określenie kierunku i prędkości ruchu, a także lokalizacja struktur w ciele.

Metoda impulsowa ma większą zdolność do rozróżniania szczegółów, co sprawia, że jest często stosowany w bardziej zaawansowanej diagnostyce medycznej, np. w ocenie przepływu krwi przez serce i naczynia.

Dopplerowska sonografia jako metoda diagnostyczna jest głównie stosowana do wykrywania przepływu krwi w tętnicach i żyłach. Dzięki tej metodzie przepływ krwi może być wykrywany oraz oceniany jakościowo i ilościowo w sposób nieinwazyjny. Urządzenia wykorzystujące metodę impulsową (pulsed-wave Doppler) pozwalają nie tylko na określenie prędkości ruchu cząstki, ale także na ustalenie jej odległości względem przetwornika ultradźwiękowego.

Kombinacja metody impulsowej Dopplera i systemów skanowania w czasie rzeczywistym (B-scan) umożliwia przypisanie anatomiczne próbki objętościowej w obrazie przekrojowym. Te zaawansowane systemy są szeroko stosowane w kardiologii i diagnostyce prenatalnej, pozwalając na monitorowanie pracy serca oraz przepływu krwi u płodu.

Zgodnie z prawem załamania kąta Dopplera wynosi:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\sin\alpha_p \frac{c_l}{c_p}\right) \quad (3)$$

gdzie:

- $\alpha_p$  to kąt padania,
- $c_p$  to prędkość dźwięku w pryzmacie,
- $c_l$  to prędkość dźwięku w cieczy.

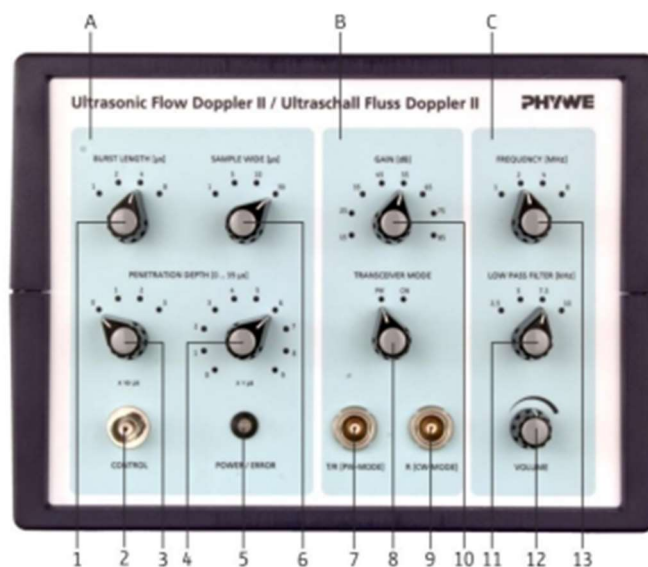


## Zadania

- Zmierz przesunięcie częstotliwości w funkcji prędkości przepływu i kąta padania.
- Oblicz prędkości przepływu.
- Przedstaw przesunięcie częstotliwości w formie graficznej jako funkcję prędkości pompy

## Sprzęt

1. Aparat Dopplera impulsów ultradźwiękowych PHYWE
2. Pompa odśrodkowa
3. Żel ultradźwiękowy
4. Ciecz do sonografii
5. Sonda ultradźwiękowa 2 MHz
6. pryzmat Dopplera 3/8
7. zestaw elastycznych rurek



Rysunek 2. Aparat Dopplera impulsów ultradźwiękowych PHYWE.

Aparat Dopplera impulsów ultradźwiękowych:

A. Jednostka czasowa dla pomiarów Dopplera impulsowego

1. Długość impulsu sygnału transmisyjnego PW (liczba impulsów = długość impulsu \* częstotliwość)
2. Złącze BNC do wyjścia sygnału czasowego PW
3. Głębokość bramki odbiorczej (cyfry dziesiątek)
4. Głębokość bramki odbiorczej (jednostki)



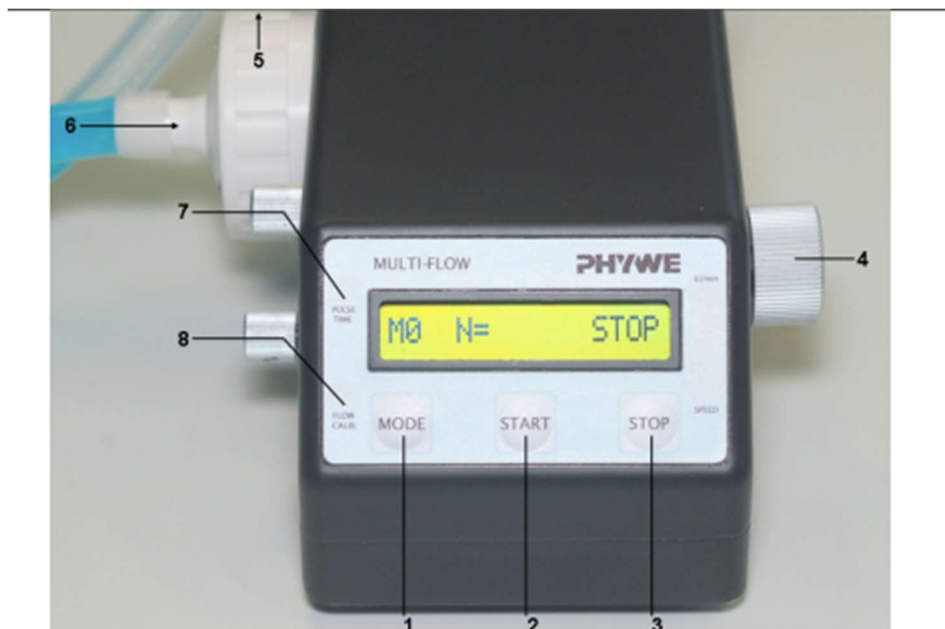
5. Diody LED błędu do wskazywania nieprawidłowych ustawień czasowych
6. Rozmiar bramki odbiorczej

#### B. Jednostka odbiorczo-nadajnikowa

7. Złącze sondy do pomiarów PW
8. Przełącznik wyboru trybu PW lub CW
9. Złącze dla sondy odbiorczej w trybie CW
10. Przełącznik obrotowy do regulacji wzmacnienia odbioru

#### C. Jednostka miksera

11. Filtr częstotliwości Dopplera
12. Regulacja głośności
13. Częstotliwość transmisji



Rysunek 3. Programowalna pompa odśrodkowa PHYWE.

#### Pompa odśrodkowa:

1. Wybór trybu
2. Przycisk startu
3. Przycisk stopu
4. Regulacja prędkości
5. Wylot pompy (rurka 3/8")
6. Wlot pompy (rurka 3/8")
7. Regulacja długości impulsu
8. Kalibracja przepływu
9. Przycisk włączania/wyłączania zasilania



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Dofinansowane przez  
Unię Europejską



Pompa odśrodkowa może generować zarówno przepływy ciągłe, jak i pulsacyjne. Jednakże, w eksperymencie Dopplera używane są tylko przepływy ciągłe. W tym celu pompa działa w trybie M0 lub M1. Przepływ można rozpocząć i zatrzymać za pomocą przycisków "START" i "STOP". Pokrętło z prawej strony reguluje prędkość przepływu. Zaleca się, aby przed rozpoczęciem pomiaru całkowicie obrócić pokrętło w lewo (minimalna wartość). Po naciśnięciu przycisku "START" należy powoli zwiększać prędkość pompy (zapoznaj się również z instrukcjami bezpieczeństwa).

W trybie M0 moc pompy jest wyświetlana w procentach, co odpowiada prędkości pompy (100% to maksymalna prędkość). W trybie M1 wyświetlany jest przepływ w l/min, ale wartość ta musi być kalibrowana dla każdego obiegu z powodu zmian oporu przepływu. (Przepływ można skalibrować przyciskiem "START" i małym pokrętłem po lewej stronie pompy. Szczegółowy opis można znaleźć w instrukcji obsługi pompy).

### Instrukcje bezpieczeństwa

Podczas podłączania rurek do pompy zaleca się odłączenie pompy od zasilania (wyjęcie wtyczki z gniazdka). Jest to szczególnie ważne podczas napełniania układu rur cieczą. W tym czasie pompę należy odłożyć na bok, aby upewnić się, że żadna ciecz nie dostanie się do obudowy pompy. Przed włączeniem pompy należy obrócić regulator "SPEED" do oporu w stronę minimalnej wartości (w lewo). Po włączeniu pompy należy powoli zwiększać prędkość, aby zapobiec rozchlapywaniu cieczy, gdy układ rur jest otwarty lub zapobiec zasysaniu powietrza przez pompę.

Obudowa modułu pompy posiada otwory wentylacyjne z tyłu i na spodzie. Nie należy ich zasłaniać.

**UWAGA:** Pompa nie jest przystosowana do ciągłej pracy przy maksymalnej prędkości. Czas pracy przy 100% prędkości nie powinien przekraczać 30 minut.

Zaleca się, aby eksperyment został przygotowany przez personel laboratorium, ponieważ pierwsza konfiguracja jest czasochłonna i podatna na błędy. Dotyczy to szczególnie napełniania układu rur cieczą do sonografii. Jeśli eksperyment nie jest używany przez dłuższy czas, należy pamiętać, że szklane kulki w cieczy do sonografii mogą osadzać się na dnie. W takim przypadku przywrócenie ich do zawiesiny może zająć trochę czasu, poprzez wielokrotne włączanie i wyłączenie pompy.

### Konfiguracja i napełnianie obiegu

Najpierw należy skonfigurować obieg za pomocą zestawu rurek i pompy odśrodkowej. Trójnik zestawu rurek powinien znajdować się na wlocie do pompy. Jeśli tak nie jest, ciecz Dopplera może rozchlapywać się z trójnika, gdy obieg jest otwarty, a prędkość jest zbyt wysoka. Po skonfigurowaniu obiegu należy go napełnić cieczą Dopplera za pomocą lejka przy trójniku. Przed napełnieniem należy energicznie wstrząsnąć butelką z cieczą, aby wymieszać cząstki rozpraszające. Jeśli w obiegu nie ma wystarczającej ilości cząstek rozpraszających, sygnał może być zbyt słaby do pomiarów. Podczas napełniania należy unikać tworzenia bąbelków powietrza, choć całkowicie nie da się ich uniknąć. Bąbelki



powinny być kierowane do trójkąta po napełnieniu, aby je usunąć z obiegu. Można to osiągnąć poprzez lekkie podniesienie elementu rurki lub uruchomienie pompy na niskiej prędkości. Kiedy obieg jest całkowicie napełniony, zaleca się zamknięcie trójkąta korkiem.

## Przebieg ćwiczenia

1. Sprawdź połączenie pompy.
2. Nałóż na pryzmat i na jego zakrzywioną powierzchnię i powierzchnię przetwornika warstwę żelu ultradźwiękowego.
3. Przymocuj pryzmat Dopplera 3/8" do rurki na prostym odcinku. Zabezpiecz pryzmat na rurce za pomocą płytki.
4. Podłącz przewód przetwornika do gniazda sondy sonografu Dopplera.
5. Ustaw częstotliwość przetwornika na 2 MHz w sonografie Dopplera.
6. Ustaw przełącznik "Sample Volume" w pozycje „Large”.
7. Ustaw jedną z trzech prędkości przepływu na pompie.
8. Wykonaj pomiar dla trzech kątów padania (15°, 30° i 60°)
9. Odczytaj wartość częstotliwości f-mean w oprogramowaniu dla odpowiadających im kątami.
10. Pomiary wykonaj dla dwóch pozostałych prędkości pompy.
11. Oblicz kąt Dopplera (3).
12. Wykorzystując wzór (2) i (3) oblicz prędkość przepływu

## Opracowanie wyników

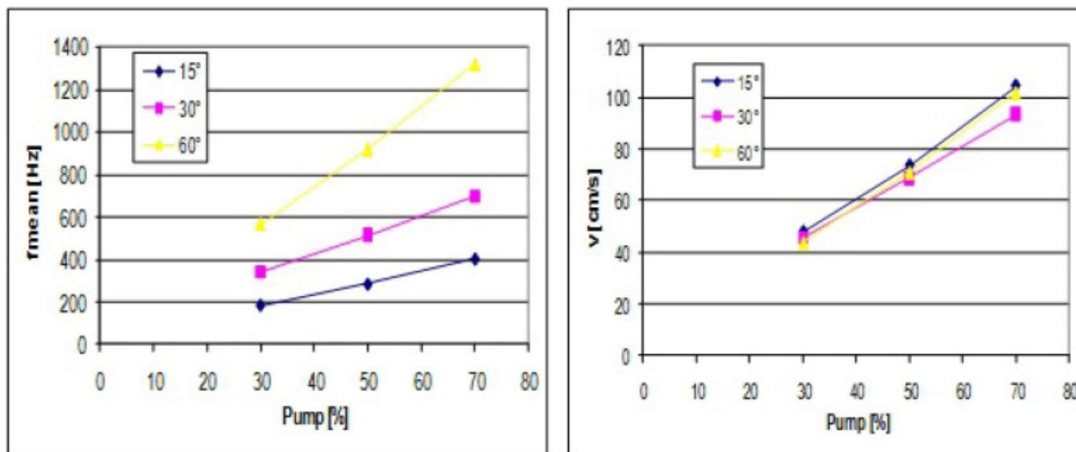
1. Wyniki przedstawić w formie tabeli np.

Tabela 1. Wyniki pomiarów przepływu

Pump [%]	Angle [°]	F-mean [Hz]	Doppler angle $\alpha$ [°]	$\cos \alpha$	v [cm/s]
30	15	185	80.0	0.17	47.71
50	15	285	80.0	0.17	73.50
70	15	405	80.0	0.17	104.45
30	30	342	70.3	0.34	45.66
50	30	515	70.3	0.34	68.75
70	30	700	70.3	0.34	93.45
30	60	570	54.3	0.58	43.93
50	60	920	54.3	0.58	70.91
70	60	1320	54.3	0.58	101.74

1. Przedstawić wykresy średniej częstotliwości i prędkości przepływu w zależności od mocy pompy





Rysunek 4. Przykładowe wyniki na wykresach wykresy średniej częstotliwości i prędkości przepływu w zależności od mocy pompy.

## Pytania kontrolne

1. Jakie zjawisko fizyczne jest podstawą działania ultrasonograficznego pomiaru przepływu metodą Dopplera i jak wpływa ono na zmianę częstotliwości fali dźwiękowej?
2. Dlaczego metoda Dopplera jest szczególnie przydatna w diagnostyce medycznej układu sercowo-naczyniowego?
3. Jakie są różnice między metodą Dopplera ciągłą (CW) a metodą Dopplera pulsacyjną (PW)? Kiedy preferuje się jedną nad drugą?
4. W jaki sposób kąt pomiędzy kierunkiem przepływu krwi a kierunkiem propagacji fali ultradźwiękowej wpływa na pomiar prędkości przepływu metodą Dopplera?
5. Jakie czynniki, takie jak lepkość krwi czy obecność osadów w naczyniach, mogą wpływać na dokładność pomiaru przepływu metodą Dopplera?