



Termodynamiczne Podstawy Inżynierii Ciepłej

Pojęcia podstawowe
Wykład 1.

Termodynamiczne Podstawy Inżynierii Ciepłej.

Prowadzący: prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki

Wydział Mechaniczno- Energetyczny Politechniki Wrocławskiej
Katedra K51 „Techniki Ciepłej”

Pok. 258 A4

Tel. 71 320 2856

E-mail: zbigniew.krolicki@pwr.edu.pl

Inżynieria Ciepłna

Czym jest Inżynieria Ciepłna (*Thermal Engineering*)?

- **Inżynieria ciepłna** – dyscyplina nauki, wiedzy i umiejętności dotycząca przetwarzania, przesyłania i dystrybucji energii na sposób ciepła lub pracy..

- Źródła energii dzielimy umownie na:

- odnawialne,

- nieodnawialne.

- Energia z powyższych źródeł jest zamieniana w elektrowniach, ciepłowniach lub elektrociepłowniach na:

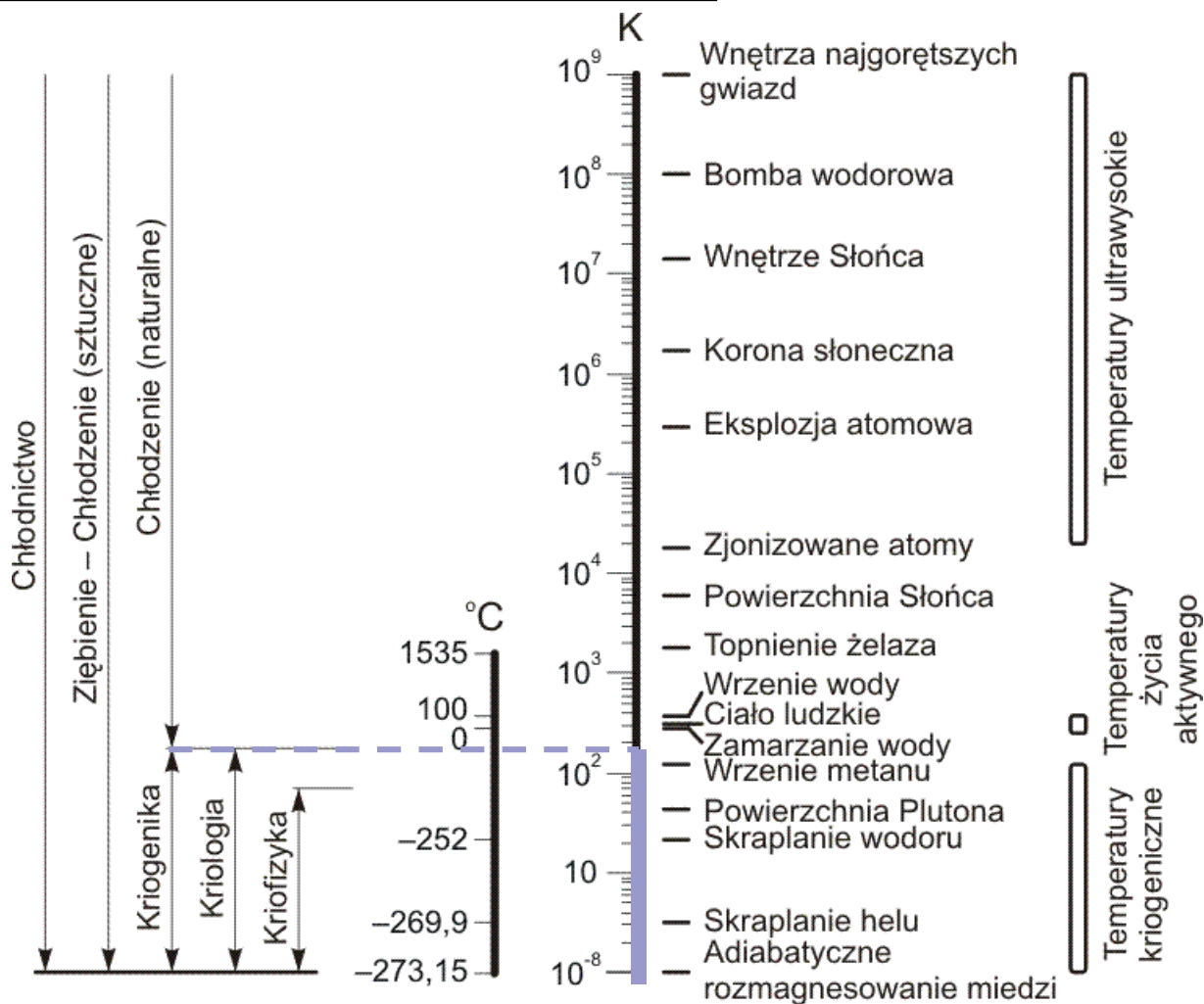
- energię elektryczną,

- energię ciepłą.



- Energia elektryczna lub ciepła może posłużyć do ukierunkowania przepływu ciepła ze źródła o temperaturze niższej do źródła o temperaturze wyższej: chłodziarka, pompa ciepła, transformator ciepła.

Inżynieria Ciepłna



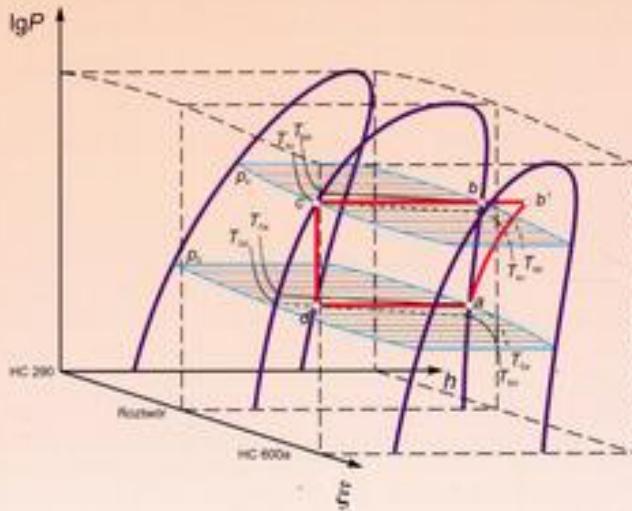
Literatura uzupełniająca do wykładu

- Szargut Jan: Termodynamika, PWN, Warszawa, 2000
- Szargut Jan: Termodynamika techniczna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011
- Szargut Jan, Guzik Antoni, Górniak Henryk: Zadania z termodynamiki technicznej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011
- Chorowski M., Kriogenika. Podstawy i zastosowanie MASTA 2008
- Kólicki Z., *Termodynamiczne podstawy obniżania temperatur*, Wrocław, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej 2006
- Białko B., Królicki Z. Zajączkowski B.: Termodynamiczne procesy i przemiany obiegów chłodniczych i Kriogenicznych, Warszawa, PWN 2016
- Białko B., Królicki Z., Zajączkowski B.: Termodynamiczne obiegi chłodnicze i Kriogeniczne, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 2016
- Ulirich H. J., *Technika chłodnicza*, Poradnik. Gdańsk, IPPU MASTA 1998—t. 1, 1999—t. 2
- Wiśniewski S., *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa Wyd.V, 2009

Termodynamiczne procesy i przemiany w obiegach chłodniczych i kriogenicznych



 PWN



Zbigniew Królicki

TERMODYNAMICZNE PODSTAWY OBNIŻANIA TEMPERATURY

 Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

BOGUSŁAW BIAŁKO, ZBIGNIEW KRÓLIK, BARTOSZ ZAŁĄCZKOWSKI

TERMODYNAMICZNE PODSTAWY OBIEGÓW CHŁODNICZYCH I KRIOGENICZNYCH

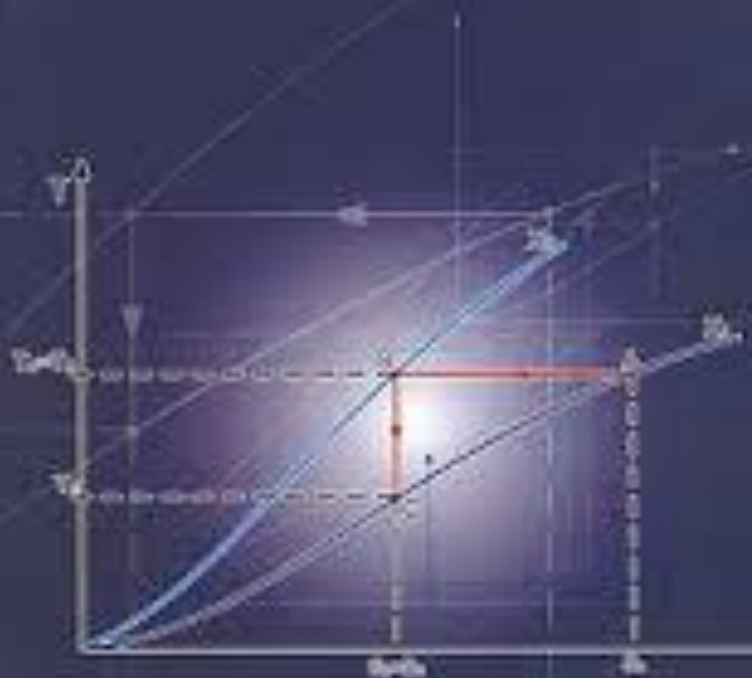


Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej



Maciej CHOROWSKI

KRIOGENIKA PODSTAWY I ZASTOSOWANIA



Tadeusz Bohdal, Henryk Charun, Marian Czapp

URZĄDZENIA CHŁODNICZE SPRĘŻARKOWE PAROWE

Podstawy teoretyczne i obliczenia

Wydawnictwo WNT



Kazimierz M. Gutkowski
Dariusz J. Butrymowicz

Chłodnictwo i klimatyzacja

MEDIUM

WYDAWNICTWO WNT





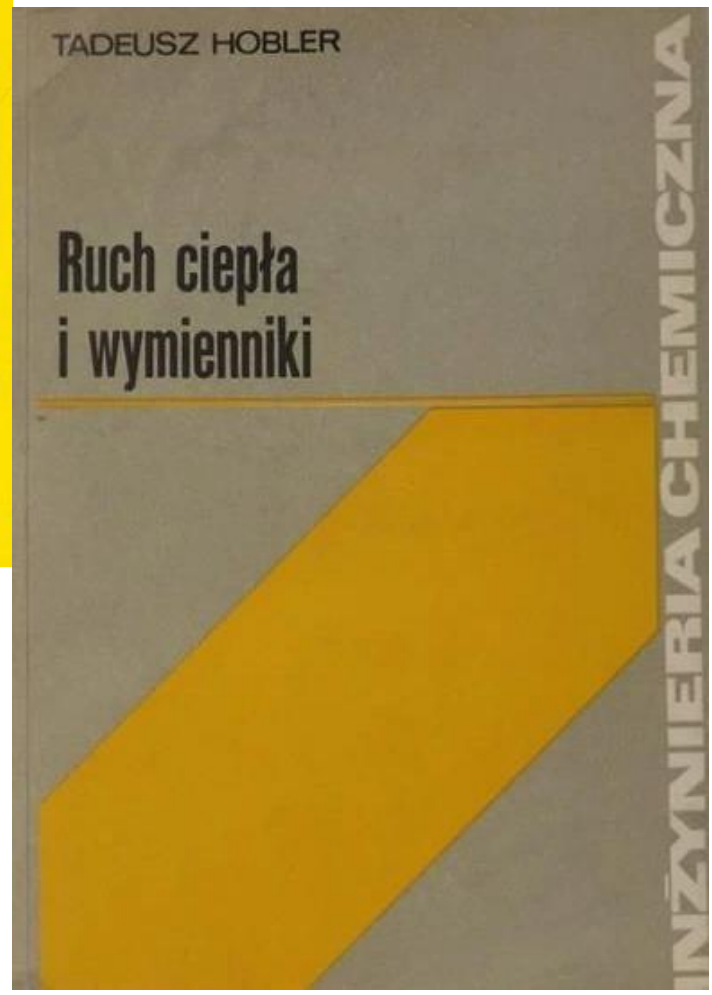
PODRĘCZNIKI AKADEMICKIE • MECHANIKA

Stefan Wiśniewski



termodynamika techniczna

Wydawnictwo WNT



TADEUSZ HOBLER

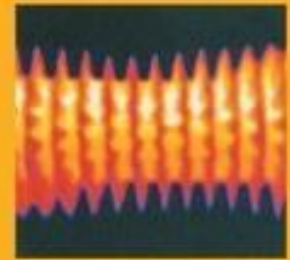
Ruch ciepła i wymienniki

INŻYNIERIA CHEMICZNA



PODRĘCZNIKI AKADEMICKIE • MECHANIKA

Stefan Wiśniewski
Tomasz S. Wiśniewski



wymiana ciepła

Wydawnictwo WNT



Pojęcia podstawowe

- **Czynnik termodynamiczny.** Medium (nośnik energii cieplnej) (gaz, para, ciecz, ciało stałe) biorące udział w procesach wymiany masy i ciepła bądź pośredniczące w procesach przekształcania energii cieplnej w pracę mechaniczną lub odwrotnie.

Gaz doskonały – posiada stałe ciepło właściwe (niezależne od temperatury i ciśnienia), nie zmienia stanu skupienia (nie ulega skropleniu) i można go traktować jako zbiór cząstek stanowiących punkty materialne. Ściśle podporządkowuje się prawom gazowym.

- ***Gaz półdoskonały*** – taki sam jak gaz doskonały z tą tylko różnicą, że jego ciepło właściwe zależy od temperatury.
- ***Gaz rzeczywisty*** – nie spełnia podanych wyżej warunków.
- W technice cieplnej jako gazy doskonałe możemy traktować:
 - a) gazy szlachetne jednoatomowe takie jak: hel, argon, neon, krypton,
 - b) gazy dwuatomowe dla ciśnień i temperatur nieznacznie odbiegających od otoczenia np. tlen, wodór, azot, tlenek węgla i ich mieszaniny. Pozostałe gazy należy traktować jako gazy rzeczywiste.

Pojęcia podstawowe-**stan**

- **Stan termodynamiczny** czynnika, substancji, systemu termodynamicznego jest **określony** przez zbiór wartości wybranych parametrów zwanych **parametrami stanu**, których zmiana umożliwia zmianę własności fizycznych.
 - **Jednoznaczne określenie** stanu termodynamicznego ciała fizycznego **umożliwia odtworzenie** tego ciała w innym miejscu w sposób zadowalający do prowadzenia analiz termodynamicznych.
 - **Wartości parametrów stanu nie zależą od rodzaju przemian** dzięki którym ciało doszło do rozważanego stanu.
-

Pojęcia podstawowe-przemiana

- **Przemiana termodynamiczna** - jest to ciąg następujących po sobie stanów termodynamicznych systemu, który prowadzi do zmiany od jednego skrajnego stanu do drugiego.
 - W czasie tego procesu ulega zmianie jedna niezależna zmienna.
 - Możliwe jest zajście przemiany równowagowej, w czasie, której kolejne etapy przemiany możemy uważać za stany równowagi.
 - Jeśli mamy do czynienia z przemianą równowagową, to możemy dokonać graficznej reprezentacji przemiany, stosując do każdego jej etapu równanie stanu. Jeżeli zmiana stanu układu jest przedstawiona graficznie w układzie współrzędnych stanowiących parametry stanu to jej obrazem jest wówczas linia zwana ***drogą przemiany***.
-

Pojęcia podstawowe

- Oprócz zmiany stanu podczas przemiany może zachodzić aktywne współdziałanie z otoczeniem w postaci oddziaływań energetycznych.
 - Jeżeli przemiana przebiega w układzie zamkniętym a stan początkowy i końcowy są identyczne, wówczas nazywana jest ona **obiegiem (zamkniętym) termodynamicznym lub cyklem**.
 - Przemianę nazywamy *odwracalną*, jeżeli jest możliwy powrót układu i otoczenia do stanu początkowego. W przeciwnym przypadku mamy do czynienia z przemianą *nieodwracalną*.
-

Oznaczenia wielkości

● **Parametry stanu ekstensywne** odniesione są do całej objętości ciała. Nie są jednakowe dla całego ciała i poszczególnych jego części. Oznacza się je dużymi literami, np.:

- E – energia,
- U – energia wewnętrzna (termodynamiczna),
- F – energia swobodna,
- H – entalpia, (I)
- S – entropia,
- V – objętość,
- T – temperatura,
- P – ciśnienie absolutne,
- Φ – potencjał Gibbsa.

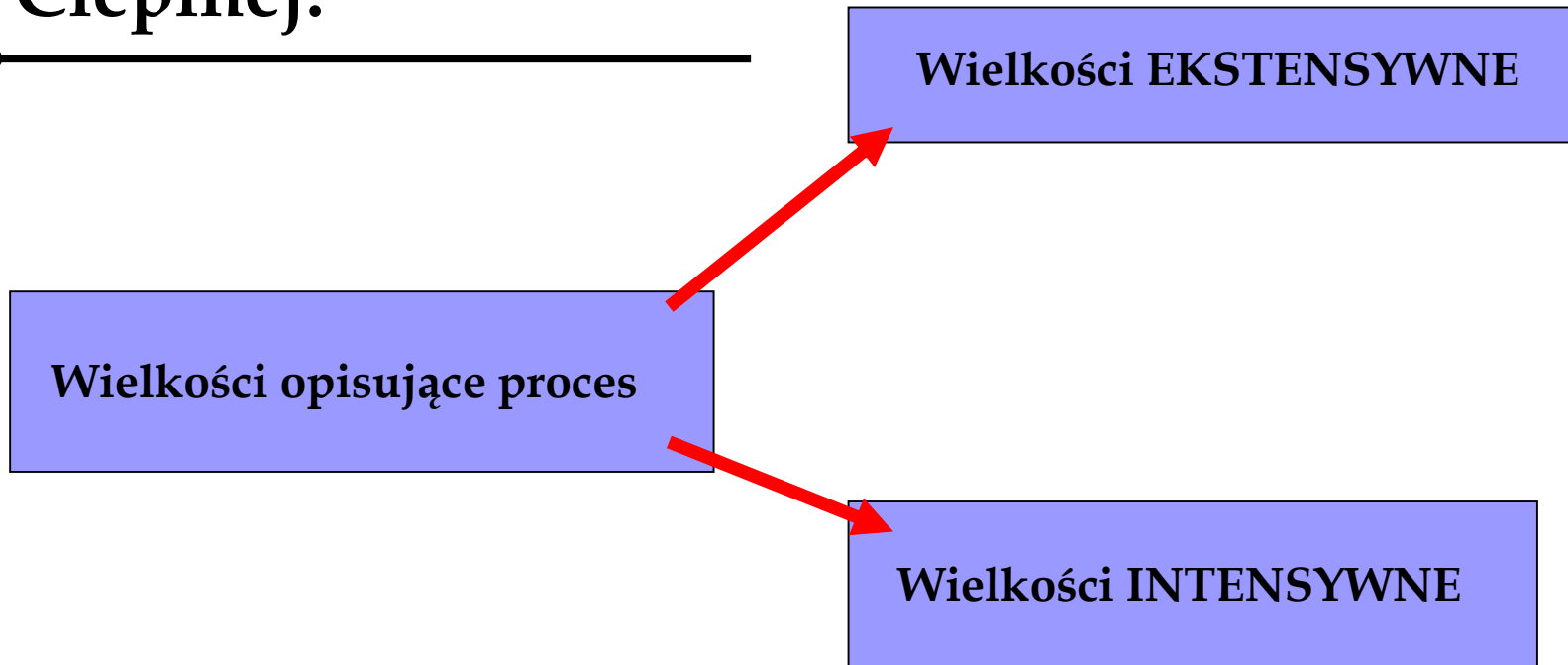
Dla podkreślenia porządku stanu, którego dana funkcja dotyczy używa się indeksów:

- indeks 1 – oznacza zawsze stan początkowy, indeks 2 – stan końcowy.

Wielkości ekstensywne zależne od stanów krańcowych i od rodzaju przemiany oznaczane są w indeksie łukiem i numerami stanów, np.:

- $W_{\sim 1-2}$, $Q_{\sim 1-2}$, $L_{\sim 1-2}$

Termodynamiczne podstawy Inżynierii Ciepłej.



DEFINICJA:

„Wielkością EKSTENSYWNA nazywamy wielkość fizyczną lub geometryczną, której akumulacja może być mierzona addytywnie, tzn. być sumą akumulacji występujących w podobszarach składających się na dany obszar. „

Akumulacja – ilość nagromadzającej się wielkości ekstensywnej w obszarze bilansowania.

Przeciwieństwem wielkości EKSTENSYWNEJ jest wielkość INTENSYWNA, **nie tworząca** akumulacji w obszarze, ponieważ może być przypisana punktowi w przestrzeni.

Oznaczenia wielkości

Parametry stanu intensywne , inaczej lokalne , mogą być jednakowe dla całego ciała oraz poszczególnych jego części.

Oznacza się je najczęściej małymi literami :

- t – temperatura,
- p – ciśnienie.

Parametry te mogą być przypisane poszczególnym punktom przestrzeni i w ten sposób tworzone są odpowiednie pola, np.:

- pole temperatury, pole ciśnienia.

Parametry właściwe dotyczące jednostki ilości substancji oznaczone są małymi literami, np.:

- $e_1, h_1, s_1, f_1, \phi_1$, itd.,
- $q_{\sim 1-2}, w_{\sim 1-2}$, itd.

Wielkości **ekstensywne** : masa, objętość, energia, pęd

Wielkości **intensywne**: ciśnienie, temperatura

Wielkości ekstensywne podlegają ogólnym zasadom bilansowania .

NIE BILANSUJEMY WIELKOŚCI INTENSYWNYCH !!!!!

Wykład nr 1 : Wiadomości wstępne. Podstawy Bilansowania

Oznaczenia wielkości

Strumienie, czyli wielkości odniesione do jednostki czasu oznaczone są kropką, np.:

- $\dot{V}, \dot{S}, \dot{Q}, \dot{L}, \dot{P}, \dot{q}$

Nazywane są one strumieniami, np.: objętości, entropii, ciepła, itd.

Przyrostem danej wielkości nazywa się jej różnicę pomiędzy stanem końcowym a początkowym, np.:

- $\Delta S = S_2 - S_1, \Delta E = E_2 - E_1, \Delta P = P_2 - P_1, \text{ itd.}$

Z matematycznego punktu widzenia „**przyrost**” danej wielkości może być dodatni lub ujemny. Zależy to tylko od wartości bezwzględnych w stanie końcowym i początkowym. W tym drugim przypadku należy mówić o „**spadku**” danej wielkości, np.:

- $-(\Delta H) = H_2 - H_1, -(\Delta P) = P_2 - P_1.$

Pojęcia podstawowe – Równanie stanu

- **Równanie stanu** to matematyczna zależność wiążąca ze sobą parametrami stanu, które nie mogą wszystkie zmieniać się dowolnie i niezależnie od siebie.
- Równanie stanu umożliwia określenie stanu równowagi ciała gdy znane są niektóre tylko parametry traktowane jako zmienne niezależne lub określenie innych parametrów zwanych funkcjami stanu. Podstawowym równaniem dla ciał prostych- gazów, par; jest termiczne równanie stanu typu $f(p, V, T)=0$ np. równanie Clausiusa - Clapeyrona

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

- Określa on stałość danej masy gazu - n , zamkniętym w objętości - V , będącym pod ciśnieniem - p i o temperaturze - T . Wartość ta jest stała i wynosi R . Z równania gazu doskonałego wynikają następujące prawa:

Pojęcia podstawowe.

Prawa gazu doskonałego

- ***Prawo Guy'a - Lussac'a***

- Objętość danej masy gazu przy określonym stałym ciśnieniu gazu, jest proporcjonalna to temperatury bezwzględnej tegoż gazu:

$$\frac{V_0}{V_k} = \frac{T_0}{T_k}$$

- ***Prawo Charlsa:***

- Ciśnienie danej masy gazu przy określonej stałej objętości gazu, jest proporcjonalne to temperatury bezwzględnej tegoż gazu:

$$\frac{p_0}{p_k} = \frac{T_0}{T_k}$$

Pojęcia podstawowe

- ***Prawo Boyle'a - Mariotta***
- Objętość danej masy gazu przy określonej stałej wartości temperatury, jest odwrotnie proporcjonalna do wartości ciśnienia bezwzględnego

$$\frac{V_0}{V_k} = \frac{p_k}{p_0}$$

Pojęcia podstawowe

Prawo Avogadra

- W określonej temperaturze i w określonym ciśnieniu znajdują się w tej samej objętości takie same ilości cząsteczek gazu doskonałego - tyle samo moli gazu doskonałego.
- Mol danej substancji, zawiera dokładnie tylko samo cząsteczek, co mol innej substancji, a mianowicie $N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$. Przy identycznych wartościach temperatury oraz ciśnienia dwóch gazów, zachodzi następujący związek pomiędzy ich objętościami V_1 i V_2 , a ich masami cząsteczkowymi M_1 i M_2 :

$$\frac{V_1}{M_2} = \frac{V_2}{M_1}$$

- Przy identycznych wartościach temperatury oraz ciśnienia dwóch gazów, objętości jednego mola tych gazów są sobie równe a stała gazowa jest identyczna dla każdego gazu doskonałego.
 - Zależności entalpii, entropii i energii wewnętrznej od temperatury nazywane są **kalorycznymi równaniami stanu**.
-

System Kontrolny

System Kontrolny – system ciał oddzielony od ciał otaczających powierzchnią kontrolną.

Systemem kontrolnym może być jakikolwiek badany obiekt - system w skali makro lub mikroskopowej. Może to być np.:

- cały system cieplny,
- wybrany aparat,
- maszyna lub
- próbka paramagnetyczna w polu magnetycznym.

Przez powierzchnię kontrolną system może wymieniać masę lub energię z otaczającym środowiskiem. Mogą być do niej przyłożone siły zewnętrzne.

System może być stacjonarny lub przemieniać się w stosunku do otoczenia. Jeżeli przez powierzchnię kontrolną nie jest wymieniana masa to taki system nazywamy zamkniętym.

W systemie otwartym przez powierzchnię kontrolną mogą przenikać strumienie substancji.

Powierzchnię kontrolną można rozpatrywać jako sztywną (mechaniczna izolacja $V = \text{const}$) lub idealnie sprężystą ($p = \text{const}$), nadać jej cechy izolacji cieplnej (systemy adiabatyczne), a także dowolne, matematyczne lub fizycznie uzasadnione, własności.

Pojęcia podstawowe -System

Pojęcie „**izolowanie systemu**” będzie oznaczało wyeliminowanie jakiejkolwiek formy współdziałania z otoczeniem.

System opisywany jest przez zbiór wartości parametrów stanu - ekstensywnych i intensywnych; funkcje i współrzędne.

Na przykład, system termomechaniczny wymieniający z otaczającym środowiskiem – ciałami – energię w formie ciepła i pracy może zostać opisany parametrami:

- $P, T; \quad v, s.$

Przy opisie systemów ziębnienia można wybrać zmienne, które ten system odpowiednio opiszą, np.:

- $p, v; \quad T, s; \quad s, v; \quad S, p; \quad T, v.$

Wybór zmiennych do analizy systemu przeprowadza się zależnie od charakteru procesu, warunków wewnętrznych i zewnętrznych.

Definiowanie Systemu

- Stan równowagi powstaje przy braku oddziaływań otoczenia na system lub gdy te działania znoszą się, a brak jest działań o charakterze przepływów, np. substancji, ciepła. Kiedy system izolowany przechodzi w stan równowagi, funkcje termodynamiczne przyjmują wartość minimalną:

$$u = u_{\min} (du = 0) \text{ przy } s = \text{const i } v = \text{const},$$

$$h = h_{\min} (dh = 0) \text{ przy } s = \text{const i } p = \text{const},$$

$$f = f_{\min} (df = 0) \text{ przy } T = \text{const i } v = \text{const},$$

$$\varphi = \varphi_{\min} (d\varphi = 0) \text{ przy } T = \text{const i } p = \text{const}.$$

Są to podstawowe warunki równowagi systemu.

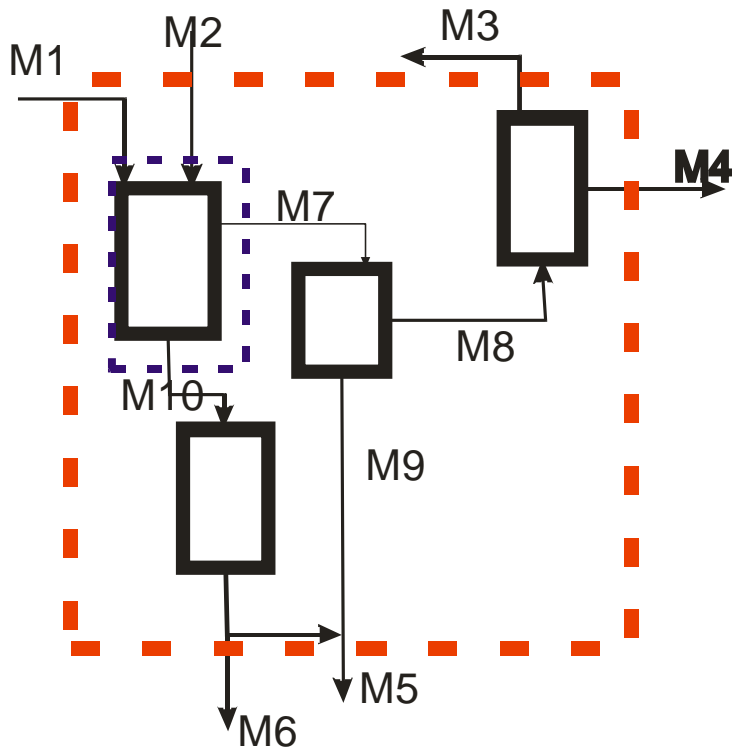
Oznaczenia i wielkości

- Stan ustalony lub stacjonarny:
- - charakterystyki nie zmieniają się w czasie.
- - mogą w nim przebiegać typowo ustalone procesy,
- - mogą wpływać i wypływać ustalone strumienie masy i energii.

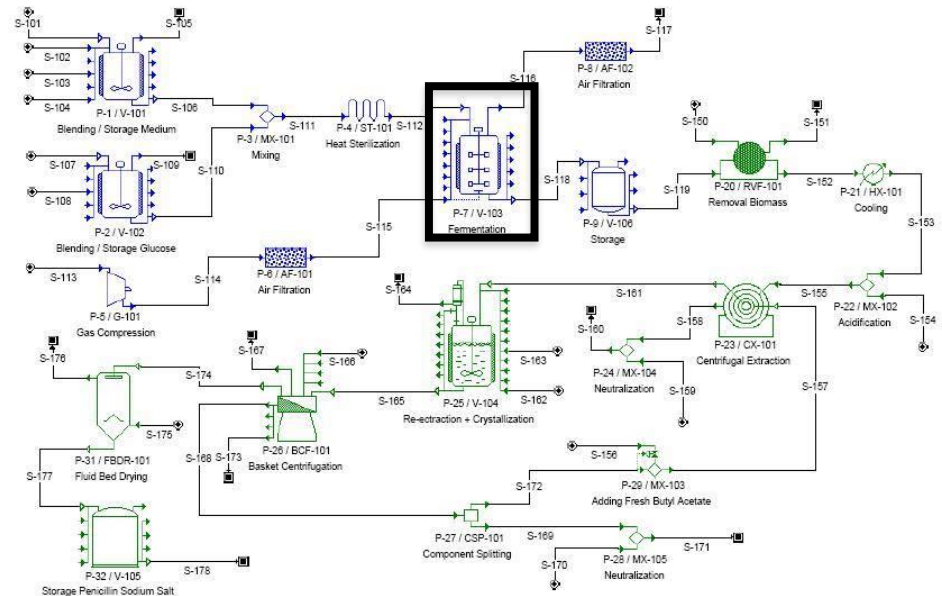
Dla systemów pracujących cyklicznie - stany średnie w czasie jednego cyklu.

AKSJOMATY BILANSOWE:

1. Określenie obszaru bilansowania (*Control Volume*)




Process Flow Diagram: Penicillin



Wykład nr 1 : Wiadomości wstępne. Podstawy Bilansowania

Wielkość ekstensywna zawarta w obszarze bilansowym (C.V) może ulegać zmianom na skutek:

- 
- Zjawisk zachodzących wyłącznie wewnątrz obszaru bilansowania
 - Oddziaływania między układem a otoczeniem przez granice układu

Zjawiska zachodzące wyłącznie wewnątrz obszaru bilans

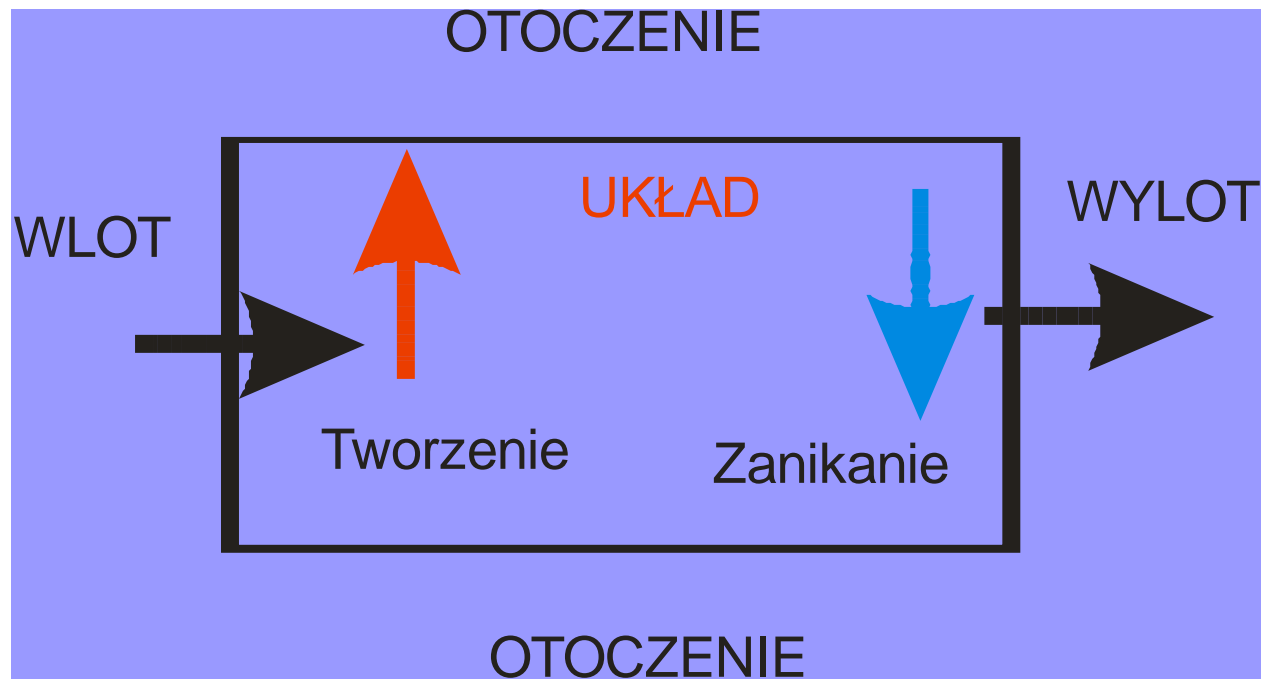
ZJAWISKO PRZEMIANY:

Wielkość ekstensywna może powstawać lub znikać z rzecz innej, współistniejącej w tym samym obszarze wielkości ekstensywnej

$$\sum_i P_i = 0$$

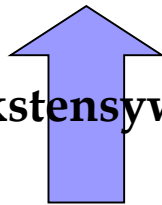
Suma produkcji, przez którą rozumiemy tworzenie i/lub zanikanie zamkniętego zbioru ulegających wzajemnie przemianie wielkości ekstensywnych, w tym samym układzie jest równa zero.

W przypadku skalarnych wielkości ekstensywnych oddziaływanie układu z otoczeniem sprowadza się do zespołu wpływających i wypływających strumieni tej wielkości z układu.





Tworzenie i napływ wielkości ekstensywnej zwiększają jej akumulacje w układzie



Zanikanie i odpływ wielkości ekstensywnej zmniejszają jej akumulacje w układzie.



Pojęcia podstawowe

■ Praca zewnętrzna

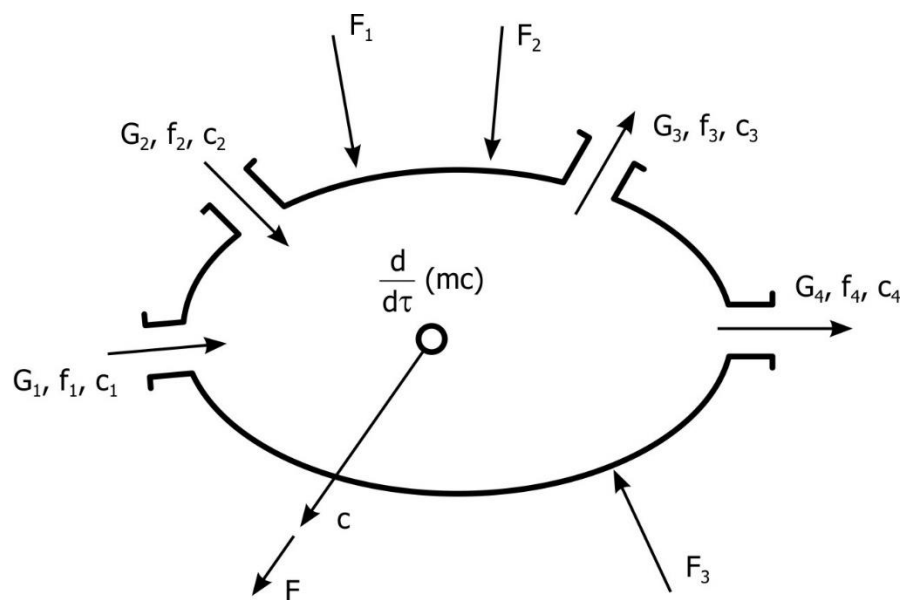
- Jest to praca, jaką należy wykonać, aby pokonać działanie sił zewnętrznych, krótko ujmując jest to oddziaływanie układu na jego otoczenie. Wynik wykonani pracy może prowadzić do zmiany położenia ciała, względem jakiegoś punktu odniesienia. Praca może zostać wykonana na układzie, lub też przez układ.
- Sposoby wykonywania pracy
 - – praca wykonana poprzez zmianę objętości układu
 - – praca wykorzystana na przeciwdziałanie siłom tarcia
 - – praca wykonana przez prąd elektryczny
 - – praca wykonana poprzez zmianę ciśnienia układu

Pojęcia podstawowe

- **Energia wewnętrzna** - parametr termodynamiczny określający stan wewnętrzny układu, do obliczenia wartości energii wewnętrznej nie uwzględnia się energii kinetycznej poruszającego się układu jako całości, oraz energii potencjalnej wynikającej z położenia układu w zewnętrznym polu sił. Natomiast uwzględnia się następujące typy energii:
 - – energia kinetyczna cząsteczek, zarówno energia ruchu postępowego jak i obrotowego
 - – energia wynikająca z oscylacji cząsteczek
 - – energia jądrowa atomów z których złożone są cząsteczki
 - – energia chemiczna jaką posiadają cząsteczki
 - – energia potencjalna pochodząca od oddziaływań międzycząsteczkowych
 - – energia elektronów w atomach

Zasada zachowania pędu

Przy analizie warunków oddziaływania sił i strumieni cieczy oraz gazów przepływających w instalacjach cieplnych, a szczególnie w opisie maszyn przepływowych – sprężarek, rozprężarek, elementów dławiących i strumienic, wykorzystywana jest powszechnie **zasada zachowania pędu** (ilości ruchu).



Rys. Zasada zachowania pędu

Zasada zachowania pędu

Przy braku oddziaływań zewnętrznych sił, pęd systemu pozostaje stały, co w formie przepływowej można wyrazić równaniem:

$$\sum G_i \cdot f_i \cdot c_i = \frac{d}{d\tau}(m \cdot C) = F$$

gdzie:

- C – prędkość średnia masy systemu, m/s
- F – wypadkowa sił zewnętrznych, N

Dla procesów stacjonarnych:

$$\frac{d}{d\tau}(m \cdot C) = 0$$

Jeżeli c_i i C są wielkościami wektorowymi, to pęd jest też wektorem.

Zasada zachowania substancji (masy)

Dla systemów nierelatywnych, suma algebraiczna strumieni masy wpływających i wypływających przez kontrolną powierzchnię, jest równa zmianie masy systemu, ograniczonego daną powierzchnią kontrolną

$$\sum G_i \cdot f_i = \Delta \dot{m}_s = \text{const}$$

$G_i = c_i \cdot \rho_i$ – gęstość strumienia masy, $\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$

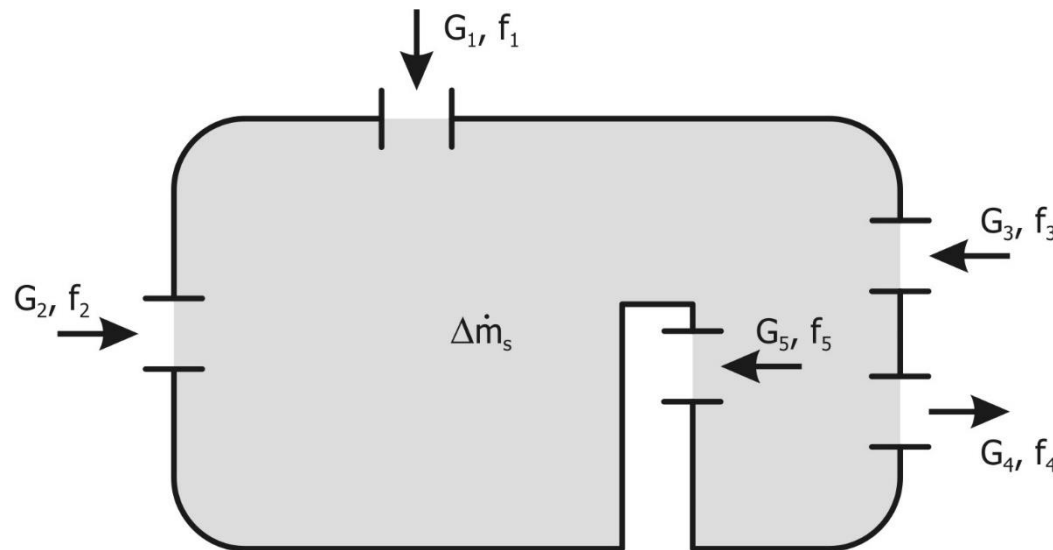
c_i – prędkość średnia strumienia, m/s

ρ_i – gęstość substancji, kg/m^3

f_i – przekrój poprzeczny przewodu, przez który wpływa i wypływa strumień, m^2

$\Delta \dot{m}_s$ – zmiana masy systemu w jednostce czasu, kg/s

Zasada zachowania substancji (masy)



Rys. System kontrolny ograniczony konkretną powierzchnią

W warunkach stacjonarnych:

$$\sum_i \Delta^i \dot{m}_s = \Delta \dot{m} = 0$$

Zasada zachowania substancji (masy)

Dla systemów wymagających rozpatrywania łącznie z otoczeniem, których stan przyjmujemy za uśredniony w czasie, możemy rozpisać:

$$\sum_i \Delta^i \dot{m}_s + \sum_j \Delta^j \dot{m}_0 = 0$$

$$d\dot{m}_s + d\dot{m}_0 = 0$$

$$\sum_{i,j} \dot{m}_{i,j} = 0$$

Dla stacjonarnych przepływów substancji pomiędzy systemem i otoczeniem każda z sum spełnia wartość zerową niezależnie.

W stanach rozruchu lub relaksacji z przepływami substancji tylko suma obu sum przyjmuje wartość zero.

BILANS MASY:

Bilans masy opiera się na podstawowej zasadzie fizyki:

ZASADZIE ZACHOWANIA MATERII

Jeżeli w rozważaniach pominiemy zagadnienie energii atomowej, to w danym układzie ilość materii **pozostaje stała**.

Jeżeli układ jest przepływowy bez reakcji chemicznej to prawo to przyjmuje postać:

Zmiana masy układu
AKUMULACJA

==

Wlot

—

Wylot

Ogólniej dla Objętości Kontrolnej o skończonych rozmiarach umieszczonej w strumieniu przepływającego płynu:

Prawo zachowania masy przyjmuje postać:

$$\left. \begin{array}{l} \text{natężenie masowe} \\ \text{strumienia} \\ \text{wypływającego} \\ \text{z objętości} \\ \text{kontrolnej} \\ (1) \end{array} \right| - \left. \begin{array}{l} \text{natężenie masowe} \\ \text{strumienia} \\ \text{dopływającego} \\ \text{do objętości} \\ \text{kontrolnej} \\ (2) \end{array} \right| + \left. \begin{array}{l} \text{szybkość} \\ \text{akumulacji} \\ \text{masy w objętości} \\ \text{kontrolnej} \\ (3) \end{array} \right| = 0$$

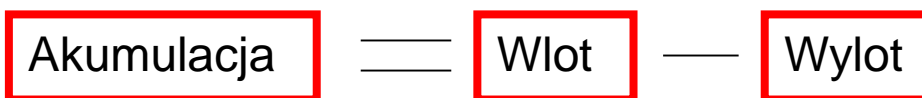
Dla procesów USTALONYCH w czasie:

$$\text{AKUMULACJA} = 0$$

Bilanse sprowadzają się wtedy do zwykłych zależności algebraicznych typu

$$\text{WLOT} = \text{WYLOT}$$

Dla procesów **NIE USTALONYCH** w czasie:



Gdzie akumulacja to matematycznie pochodna po czasie :

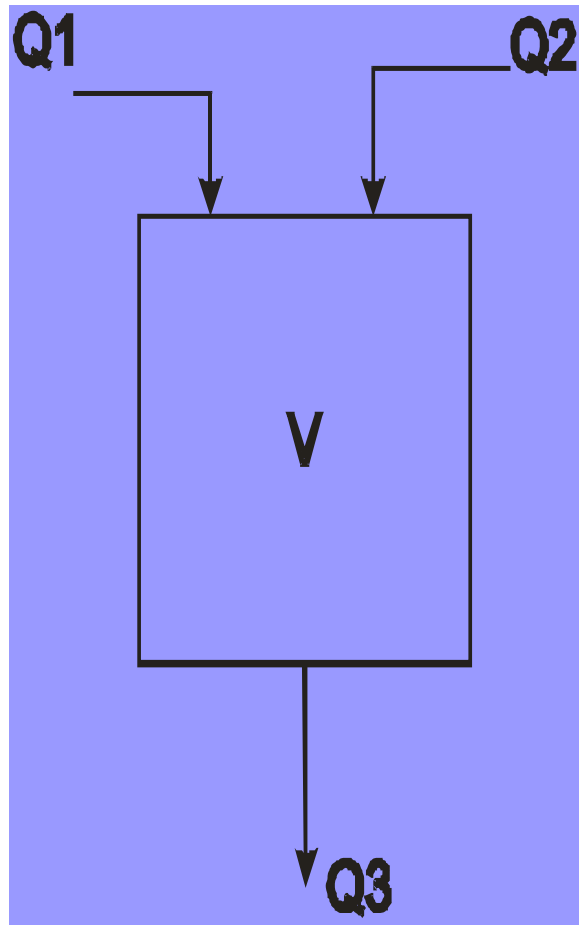
$$\frac{d[m]}{dt}$$

– to bilansowana wielkość w obszarze kontrolnym

Zagadnienia i pytania do wykładu 1.

1. Scharakteryzuj stan ustalony systemu.
2. Cechy osłony Bilansowej.
3. Co to jest przemiana termodynamiczna
4. Zapisz Zasadę zachowania masy dla systemów wymagających rozpatrywania łącznie z otoczeniem.
5. Przykład 5.

Przykład 5. (Bilans masy - proces nieustalony)



Do zbiornika wpływają dwa strumienie $Q1$ [m^3/h] i $Q2$ [m^3/h] a wypływa $Q3$ [m^3/h]

W chwili $t=0$ zbiornik jest pusty. Wyznaczyć Czas napełniania zbiornika jeżeli jego objętość wynosi V_k [m^3]

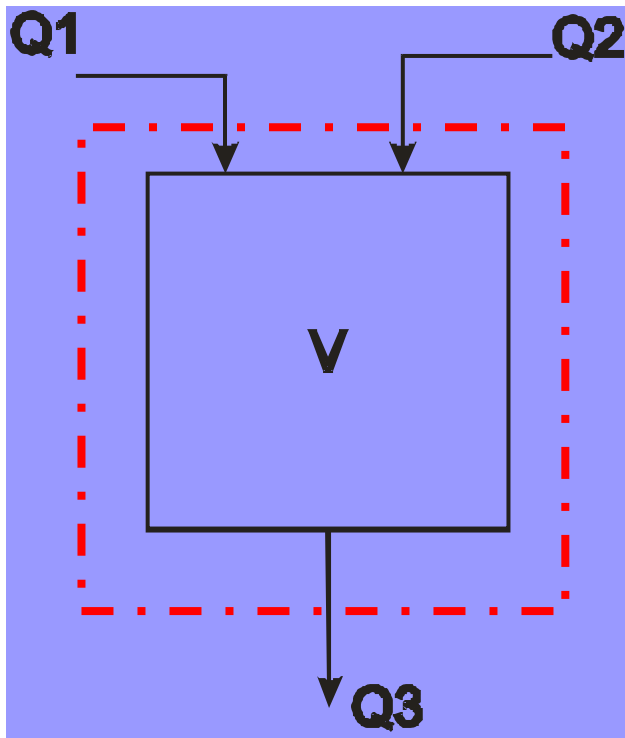
Akumulacja

=

Wlot

—

Wylot




$$\frac{dm}{dt} = m_{in} - m_{out}$$

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho Q_1 + \rho Q_2 - \rho Q_3$$

Zakładamy że gęstość jest stała więc:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho(Q_1 + Q_2 - Q_3)$$



$$\frac{dV}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q_3$$

Dostaliśmy równanie różniczkowe opisujące zmianę objętości zbiornika w czasie które całkujemy:

$$\int_{V=V_0}^{V=V_k} dV = (Q_1 + Q_2 - Q_3) \int_{t=t_0}^{t=t_k} dt$$

Ostatecznie dostajemy:

$$t_k = \frac{V_k}{(Q_1 + Q_2 - Q_3)}$$

Wykład nr 1 : Wiadomości wstępne. Podstawy Bilansowania
