

# Wykład 12



# Plan zajęć

- Rekuperacja ciepła
- System do pracy ciągłej z odzyskiem masy
  - Układ podstawowy
  - Układ wielostopniowy
  - Układ dwu-parowaczowy
  - Układ resorpcyjny
- Inne konstrukcje chłodziarek
- Modelowanie dwuadsorberowego systemu adsorpcyjnego



Politechnika Wroclawska

# Rekuperacja ciepła

System adsorpcyjny do pracy ciągłej z możliwością odzysku ciepła



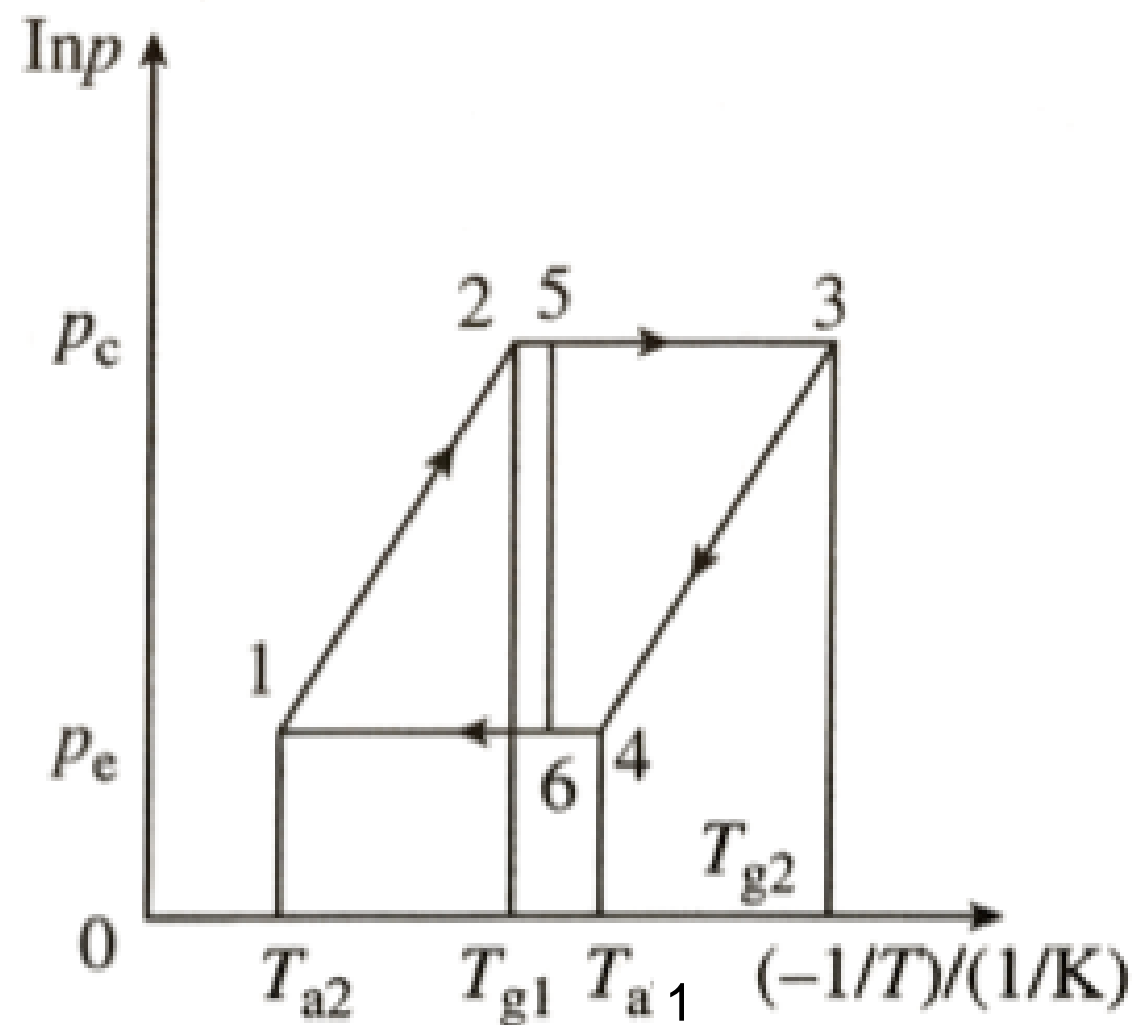
# Odzysk ciepła (podstawowy)

- Duża ilość ciepła jest **tracona w procesie ogrzewania/ochładzania adsorbera (fazy pośrednie cyklu pracy)**, znacząco wpływając na współczynnik efektywności COP.

$$COP = \frac{Q_0 - Q_{rliq}}{Q_h + Q_d}$$

- Odzysk ciepła w adsorpcyjnych systemach chłodniczych przeprowadza się w ten sposób, że **podczas pośrednich faz cyklu pracy złoża gorące łączy się cieplnie ze złożem zimnym**, do momentu zrównania temperatur w obu złożach.

# Odzysk ciepła (podstawowy)



$$Q_1(T) = Q_h \Big|_{T_{a2}}^{T_{g1}} + Q_d \Big|_{T_{g1}}^{T_3}$$

$$Q_2(T) = Q_c \Big|_{T_{a1}}^{T_{g2}} + Q_{ad} \Big|_{T_6}^{T_{a1}}$$

$$Q_1(T) = Q_2(T)$$

Rys. Odzysk ciepła w układzie z dwoma adsorberami.



# Temperatura regeneracji

- Temperaturę regeneracji wyznacza się z założenia:

$$Q_1(T_{reg}) = Q_2(T_{reg})$$

- Temperatura regeneracji może być inna dla adsorbera w fazie desorpcji i adsorbera w fazie adsorpcji. W sytuacjach teoretycznych przyjmuje się je za równe, tzn.

$$T_{reg} = T_5 = T_6$$

- W rzeczywistości, biorąc pod uwagę różnice temperatur oraz czas odzysku desorpcji i adsorpcji:

$$T_5 < T_6$$





# Fala cieplna

- System adsorpcyjny z odzyskiem ciepła realizowanym za pomocą tzw. fali cieplnej został zaproponowany przez Sheltona w 1986 roku (US Patent 4610148).
- Jego podstawową zaletą jest **minimalizacja strat cieplnych – ciepło z “gorącego” z adsorbera jest kierowane do adsorbera “zimnego”**, co ułatwia duża różnica temperatur.
- W przeciwieństwie do podstawowego odzysku ciepła, który kończy się w momencie zrównania temperatur obu złóż, system z falą cieplną pozwala przeprowadzić regenerację niejako “do końca”.



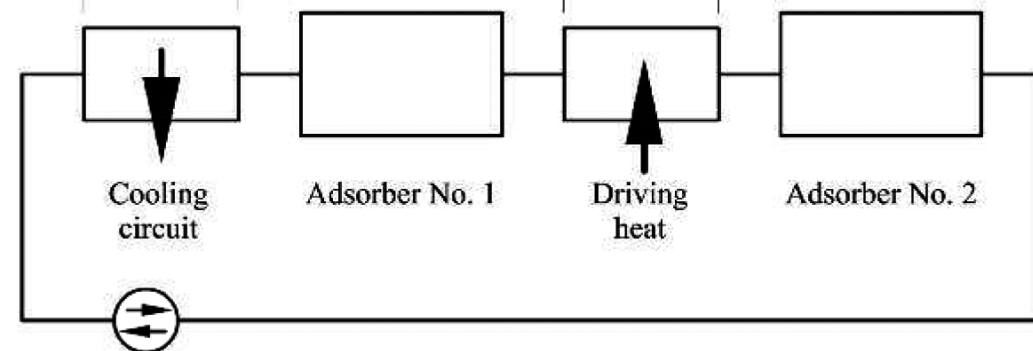
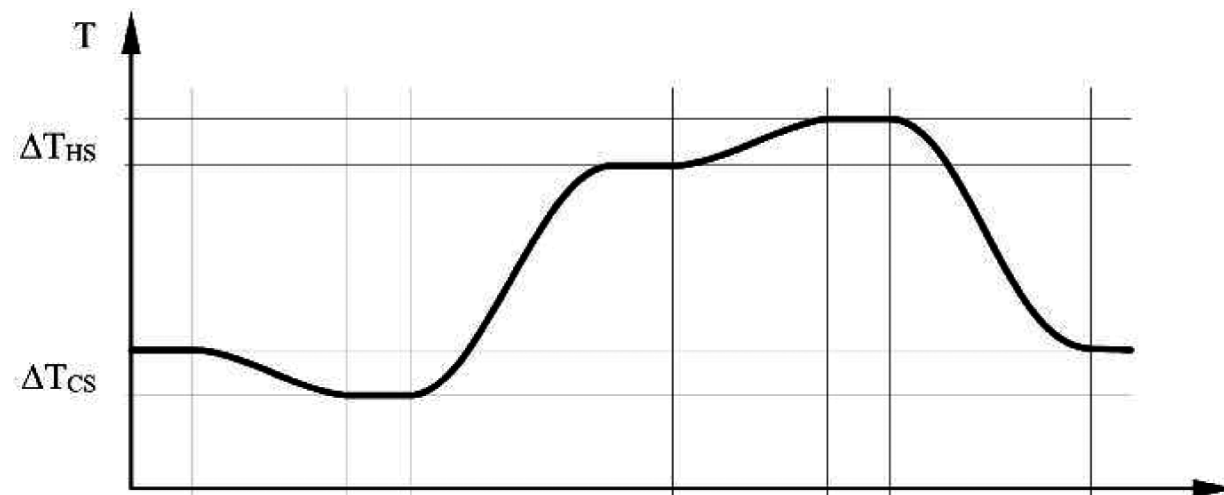
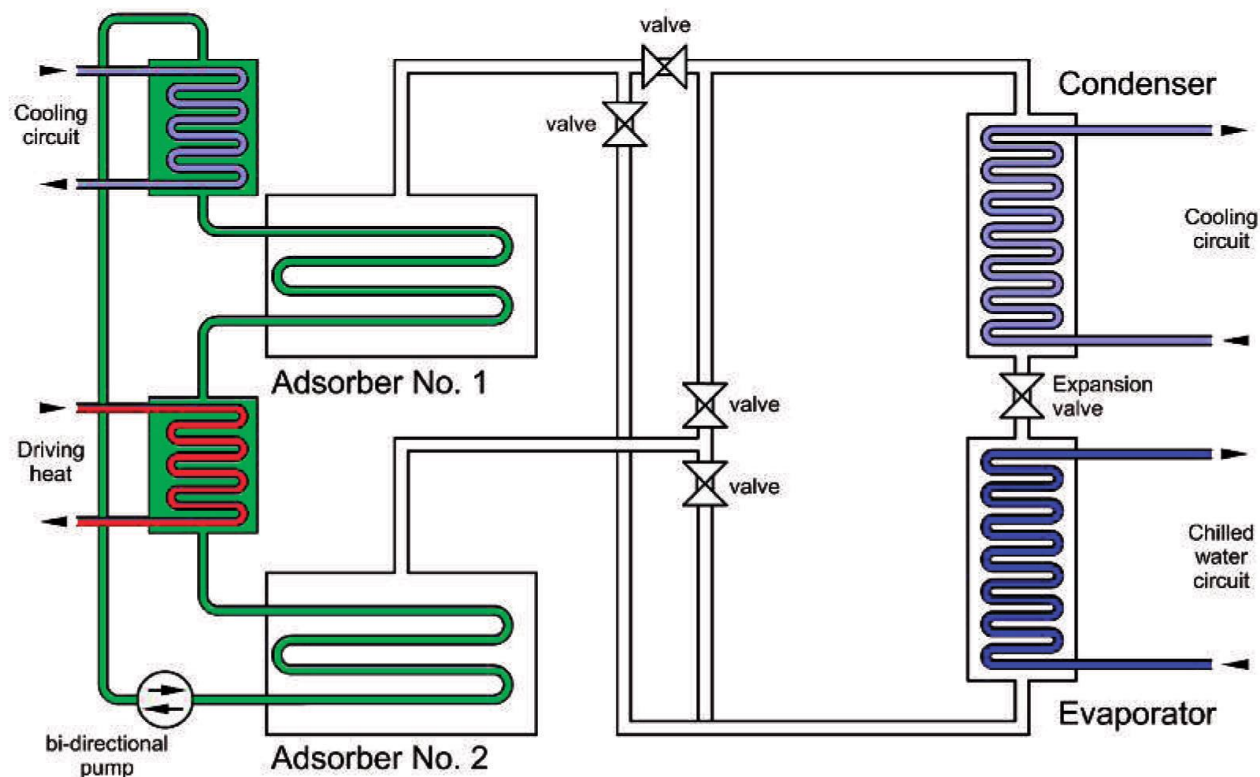


# Fala cieplna

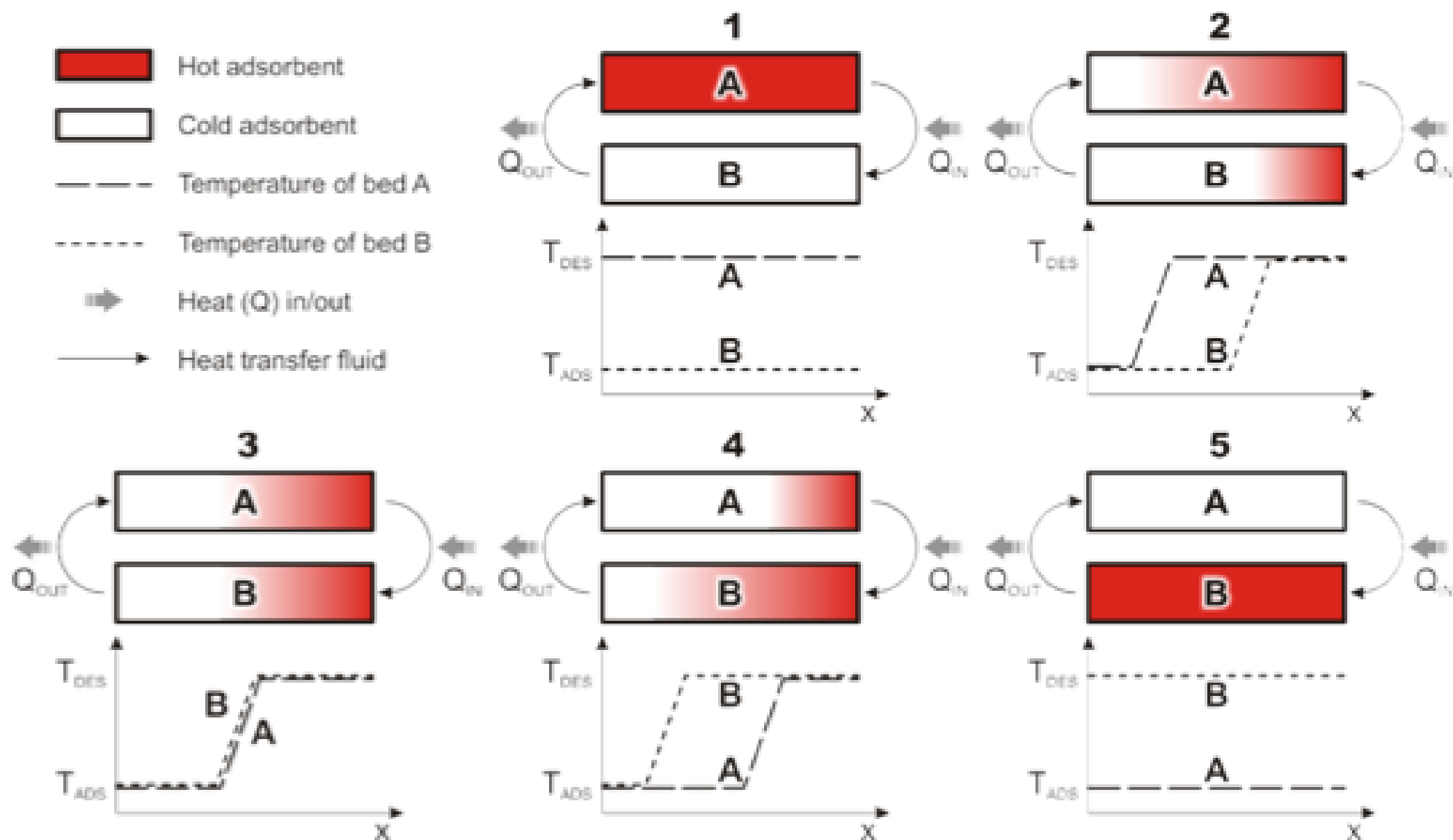
- W systemie z falą cieplną oba złoża oraz oba źródła (ciepło na potrzeby desorpcji oraz chłodzenie na potrzeby adsorpcji) są ze sobą połączone w jednym obiegu cieplnym.
- W rezultacie ciepło które wydziela się w jednym złożu jest transportowane do drugiego, będąc “uzupełniane” o ciepło ze źródła.
- Tak przeprowadzona rekuperacja pozwala osiągnąć efektywność odzysku ciepła na poziomie 80%.



# Fala ciepła



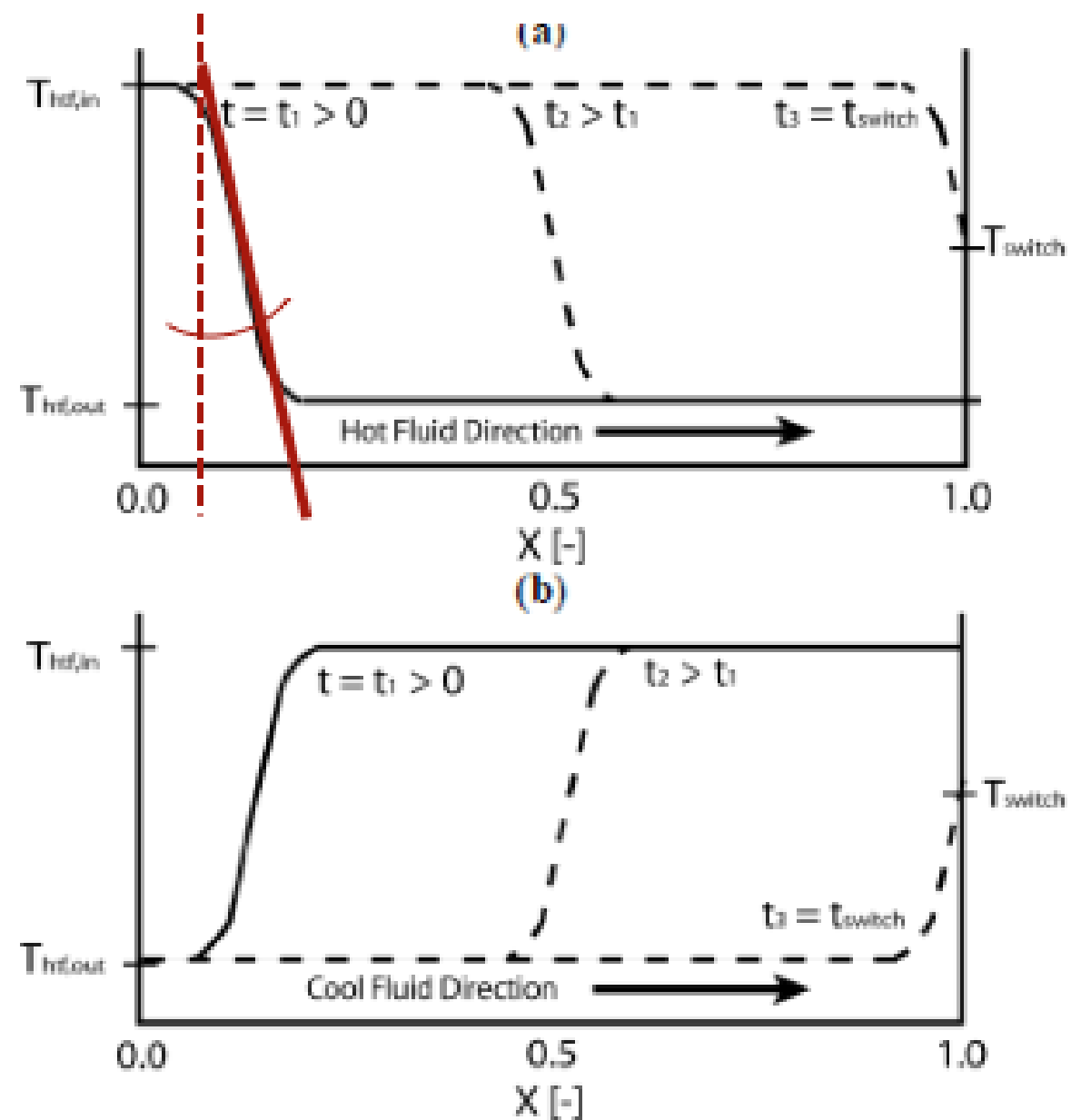
# Odzysk ciepła i fala cieplna



Rys. Zasada działania odzysku ciepła z wykorzystaniem fali cieplnej.

# Odzysk ciepła i fala cieplna

- Kąt nachylenia fali zależy od parametrów termodynamicznych złoza – w szczególności **od jego przewodności cieplnej w kierunku promieniowym**.
- Przy większym kącie nachylenia duża część złoza nie jest wykorzystywana, co negatywnie wpływa na efektywność chłodnicza urządzenia.



Rys. Zmienność fali cieplnej w czasie.



Politechnika Wroclawska

# Rekuperacja masy

System adsorpcyjny do pracy ciągłej z możliwością odzysku masy



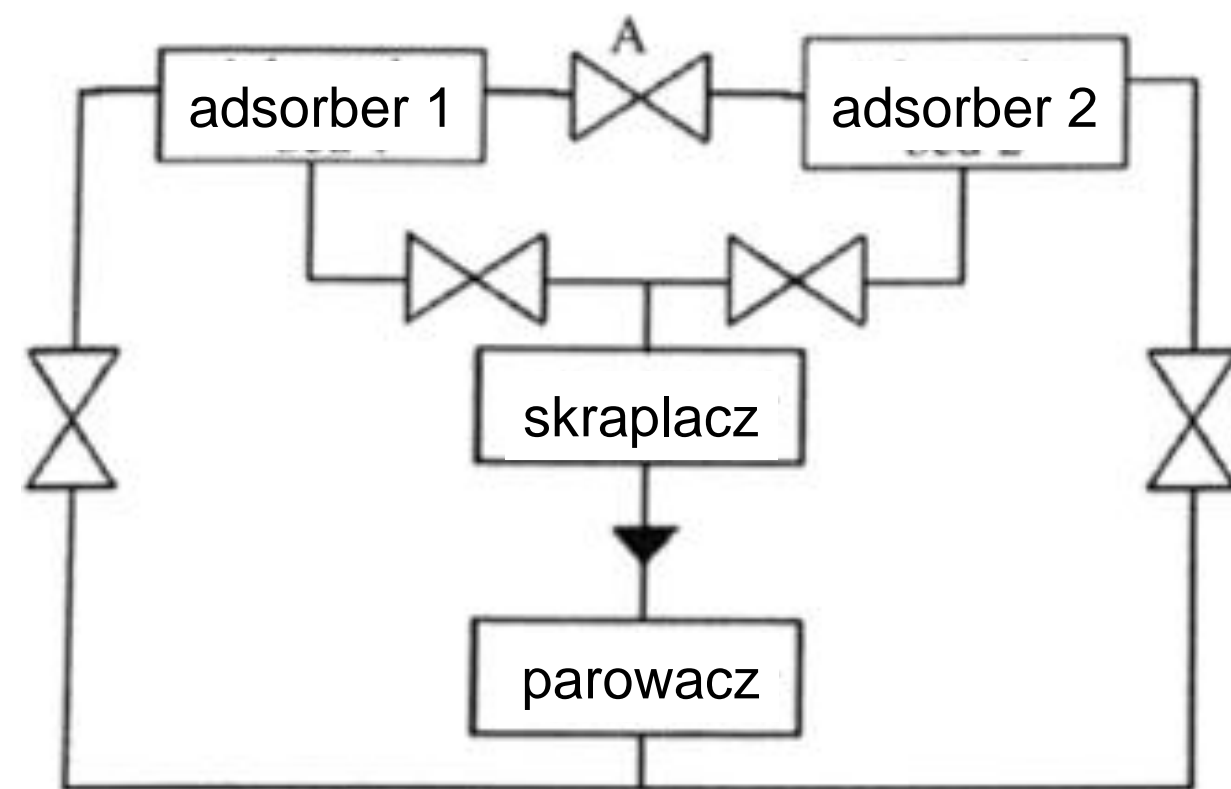
# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Układ podstawowy odzysku masy realizuje się poprzez bezpośrednie połączenie ze sobą dwóch lub więcej adsorberów podczas pośredniej fazy cyklu pracy.
- W ten sposób para czynnika uwolniona z jednego adsorbera zamiast do skraplacza przepływa do drugiego adsorbera.
- Najważniejszym efektem odzysku masy jest wzrost zdolności adsorpcyjnej, a tym samym wydajności chłodniczej urządzenia adsorpcyjnego.



# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Połączenie ze sobą tych adsorberów podczas fazy pośredniej cyklu pracy przyspieszy proces desorpcji w “gorącym” złożu, co przekłada się na wzrost zdolności adsorpcyjnej złoża, a tym samym efektywności COP całego systemu adsorpcyjnego.

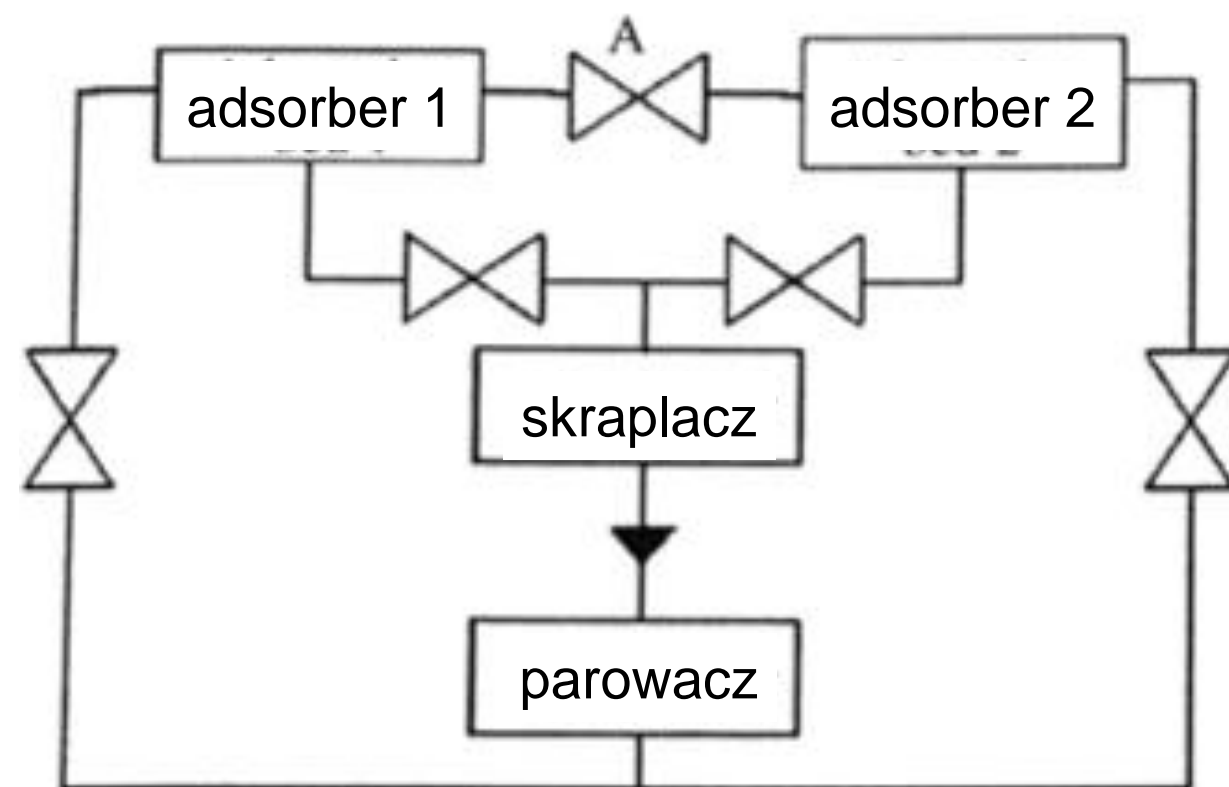


Rys. Schemat podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja fizyczna).



# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Zasada działania jest następująca:
- Kiedy kończy się proces desorpcji w złożu 1, jednocześnie kończy się proces adsorpcji w złożu 2.
- W tym momencie zostają zamknięte wszystkie zawory łączące adsorbery z parowaczem i skraplaczem oraz zostaje otwarty zawór A.
- Rozpoczyna się przepływ czynnika ze złoża 1 (w którym panuje wyższe ciśnienie skraplania) do złoża 2 (niższe ciśnienie parowania).

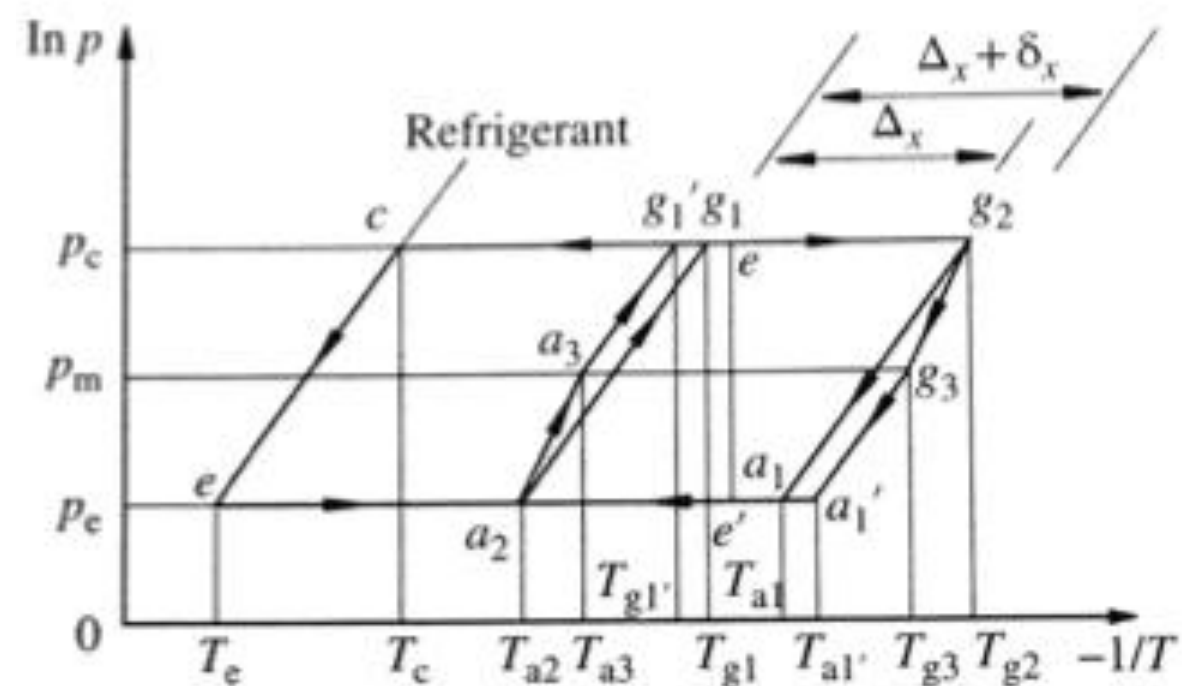


Rys. Schemat podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja fizyczna).



# Podstawowy układ z odzyskiem masy

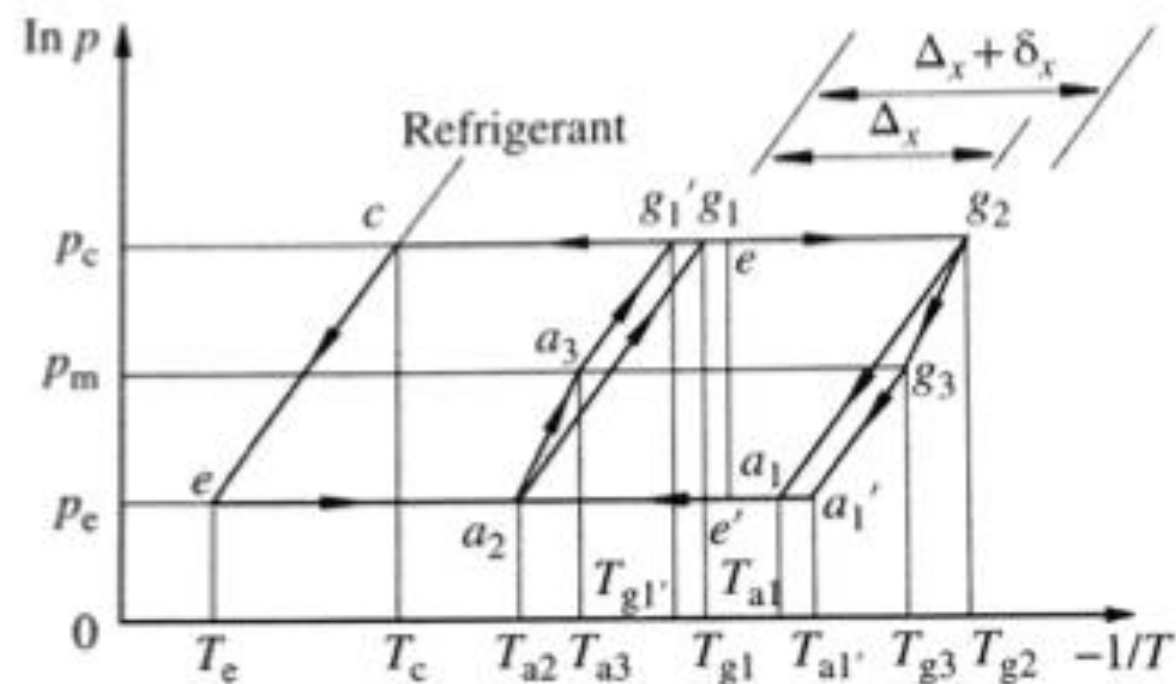
- Wskutek tego połączenia temperatura i ciśnienie w **złożu 1** spadną do tych w punkcie **g<sub>3</sub>**, natomiast w **złożu 2** wzrosną do tych w punkcie **a<sub>3</sub>**.
- Jeśli odzysk masy połączony jest jednocześnie z odzyskiem ciepła, to po zakończeniu odzysku masy, rekuperacja będzie kontynuowana w złożu 1 w punktach **g<sub>3</sub>-a<sub>1</sub>'-e'**, natomiast w złożu 2 w punktach **a<sub>3</sub>-g<sub>1</sub>'-e**.



Rys. Schemat podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja fizyczna).

# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Podstawową własnością odzysku masy jest wzrost zdolności adsorpcyjnej złoża o  $\delta x$ , co oznacza jednocześnie **wzrost wydajności chłodniczej systemu adsorpcyjnego** (w odróżnieniu do odzysku ciepła, który prowadzi do **wzrostu efektywności chłodniczej systemu adsorpcyjnego**).
- Stary cykl przebiega pomiędzy punktami:  **$a_2$ - $g_1$ - $e$ - $g_2$ - $a_1$ - $e'$ - $a_2$** , natomiast nowy:  **$a_2$ - $a_3$ - $g_1'$ - $e$ - $g_2$ - $g_3$ - $a_1$ - $e'$ - $a_2$** .



Rys. Schemat podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja fizyczna).



# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Zakładając adsorpcję fizyczną oraz ignorując wszelkie straty (złoża termicznie izolowane od otoczenia) proces odzysku masy zajdzie pomiędzy punktami **a<sub>2</sub>-a<sub>3</sub>** oraz **g<sub>2</sub>-g<sub>3</sub>**.
- Para czynnika przepłynie pomiędzy adsorberami wskutek różnicy ciśnień. Spadek ciśnienia w złożu 2 odpowiada wzrostowi ciśnienia w złożu 1. Jednocześnie przyrost zdolności adsorpcyjnej jest w obu przypadkach taki sam.

$$P_{g3} = P_{a3}$$

$$\delta x_{a2-a3} = \delta x_{g2-g3}$$

# Podstawowy układ z odzyskiem masy

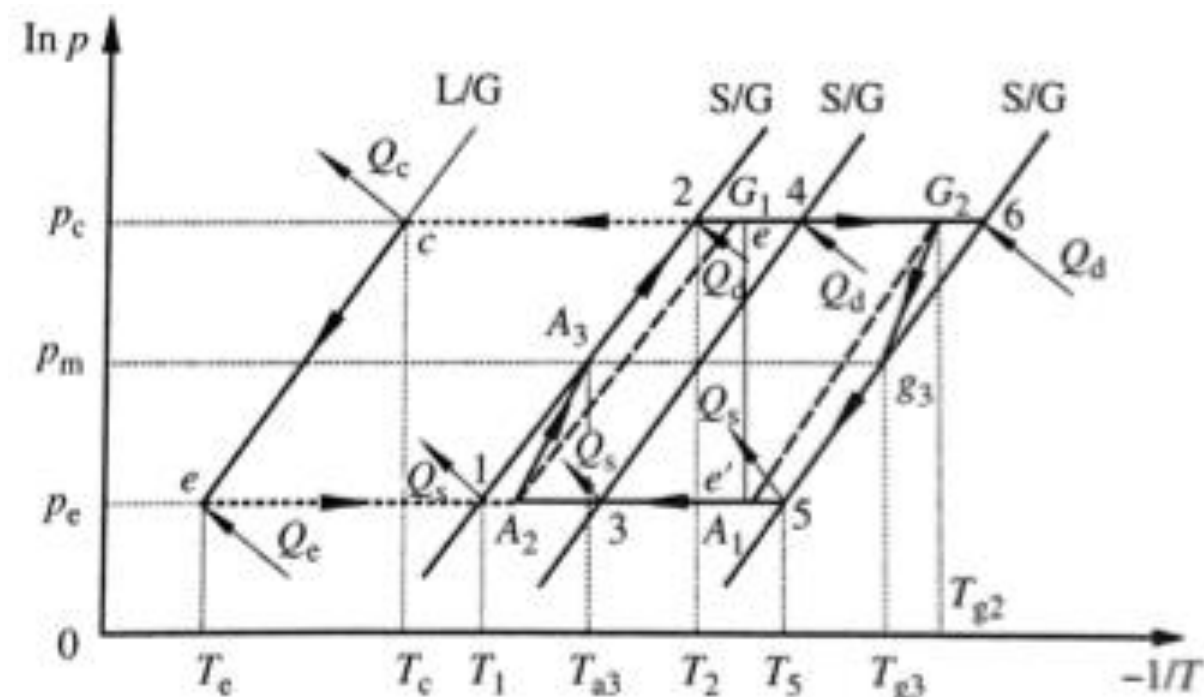
- Ze względu na zachodząca desorpcję temperatura w złożu niskociśnieniowym oraz niskotemperaturowym wzrośnie, natomiast temperatura w złożu wysokociśnieniowym oraz wysokotemperaturowym spadnie wskutek adsorpcji czynnika.

$$(c_a + xc_{pL})(T_{a3} - T_{a2}) = \Delta h \delta x_{a2-a3}$$

$$(c_a + xc_{pL})(T_{g3} - T_{g2}) = \Delta h \delta x_{g2-g3}$$

Gdzie:

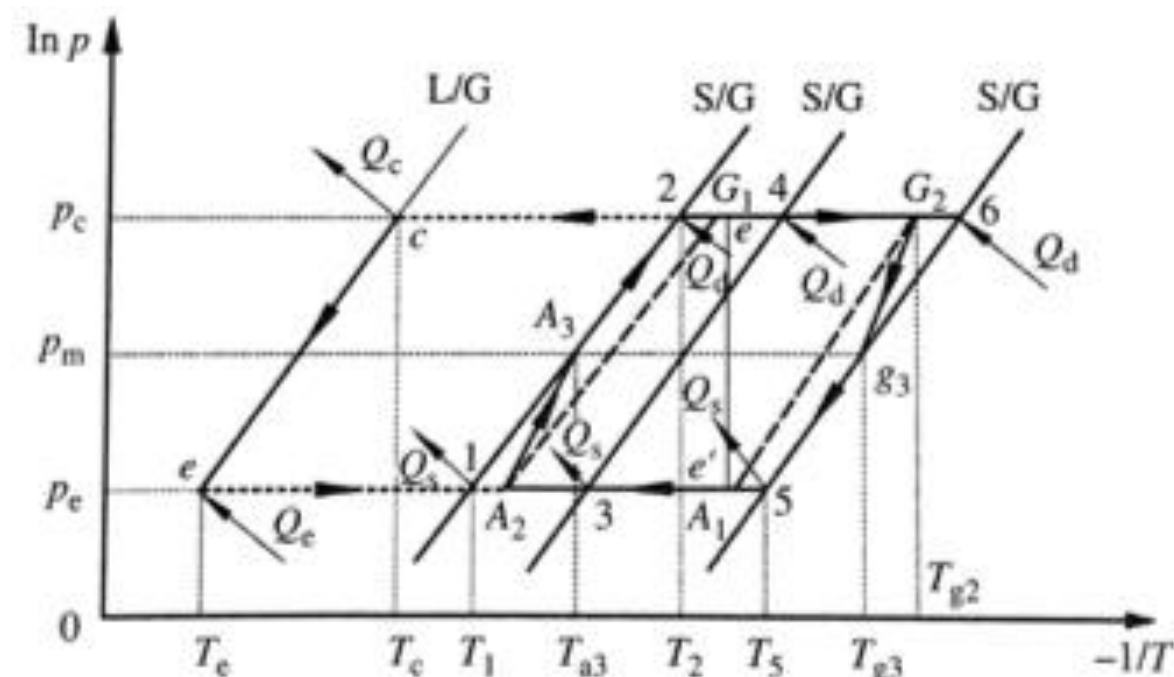
- $h$  ciepło adsorpcji/desorpcji
- $c_a$  ciepło właściwe adsorbentu
- $c_{Lc}$  ciepło właściwe ciekłego czynnika





# Podstawowy układ z odzyskiem masy

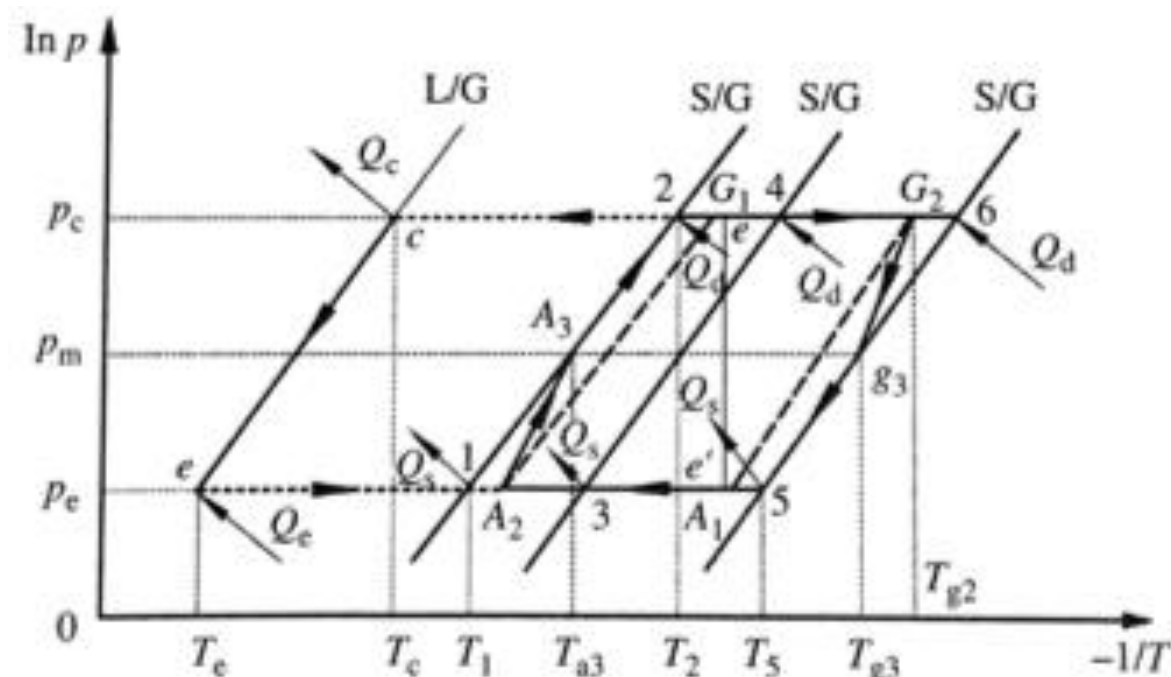
- W przypadku adsorpcji chemicznej problem jest bardziej skomplikowany. Odzysk masy może nastąpić tylko tam, gdzie mamy do czynienia z szeregiem konsekwentnych reakcji chemicznych, tak jak w przypadku chlorku wapnia.



Rys. Wykres p-T podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja chemiczna).

# Podstawowy układ z odzyskiem masy

- Skrajne izostery adsorpcji **1-2** oraz **5-6** znajdować się będą poza cyklem, który jest tu zdefiniowany przez punkty: **A<sub>2</sub>-G<sub>1</sub>-G<sub>2</sub>-A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>**.
- W tym cyklu możliwa recyrkulacja masy to **2 mol amoniaku na mol chlorku wapnia**.



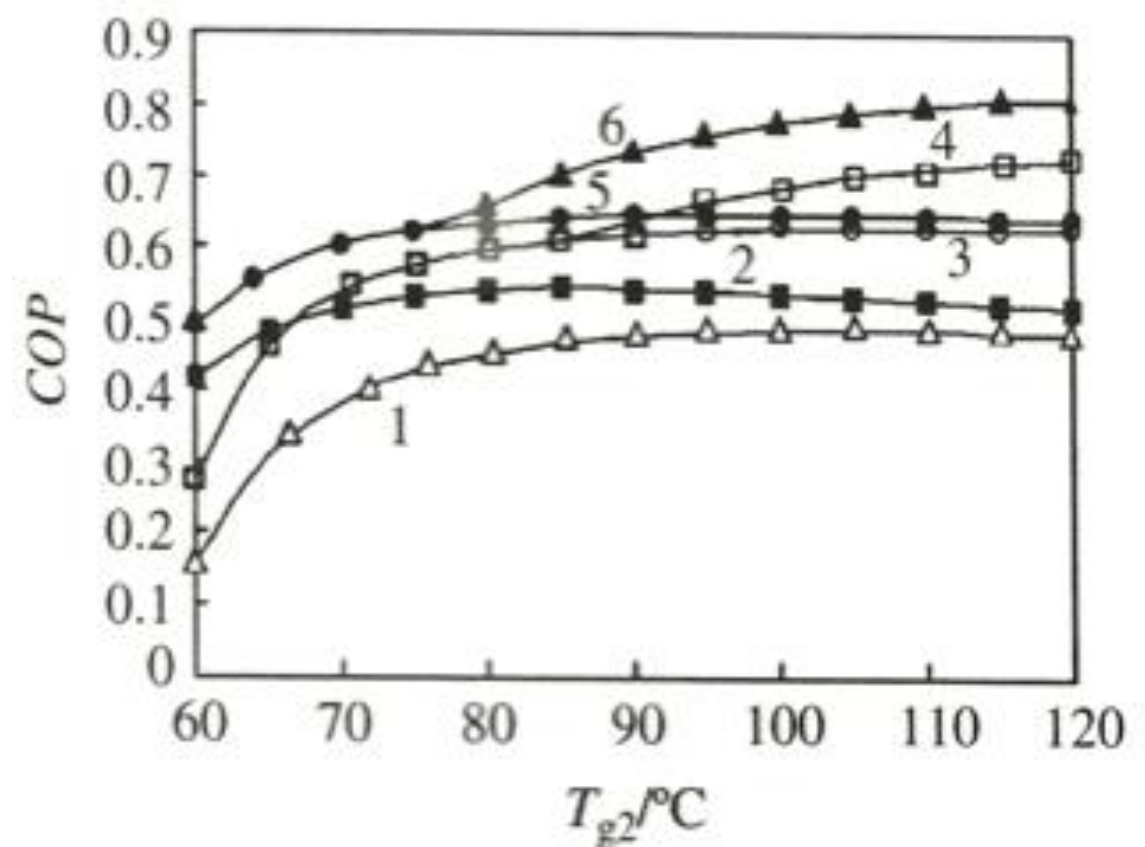
Rys. Wykres p-T podstawowego systemu z odzyskiem masy (adsorpcja chemiczna).



# Podstawowy układ z odzyskami

Na rysunku przedstawiono wzrost COP dla różnych typów obiegów adsorpcyjnych w funkcji temperatury desorpcji.

1. Układ podstawowy
2. Odzysk masy
3. Odzysk ciepła zakumulowanego w złożu
4. Odzysk ciepła zakumulowanego w złożu oraz ciepła adsorpcji
5. Odzysk masy oraz ciepła zakumulowanego w złożu.
6. Odzysk masy, ciepła zakumulowanego w złożu oraz ciepła adsorpcji



Rys. Wartość COP dla różnych typów obiegów adsorpcyjnych  
 $T_0=5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_k=T_a=25^{\circ}\text{C}$ .



Politechnika Wroclawska

# Rekuperacja masy

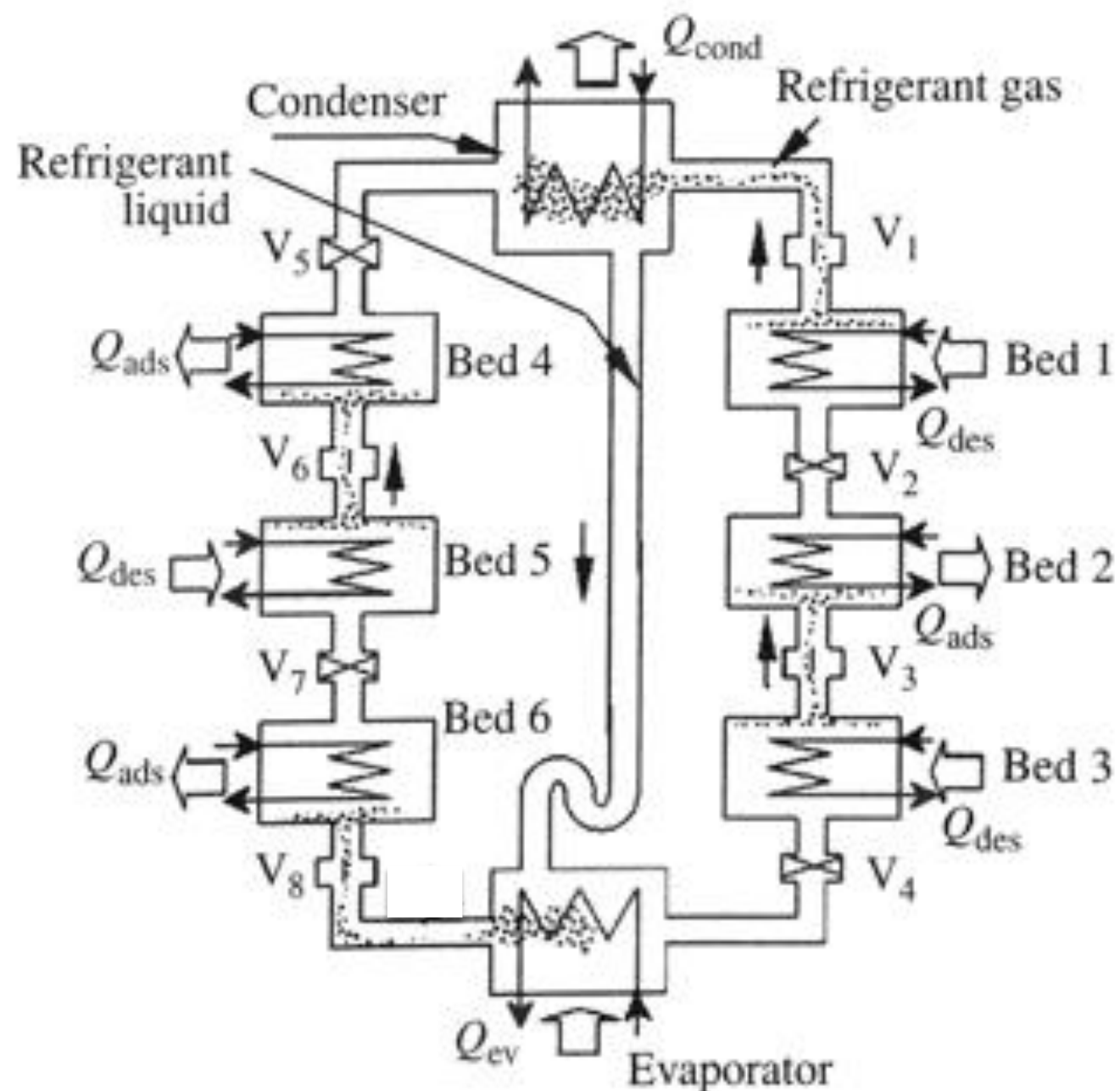
Wielostopniowy system adsorpcyjny



# Układ wielostopniowy

- Wielostopniowy system adsorpcyjny wymaga dwóch lub więcej adsorberów i działa łącząc ze sobą procesy desorpcji w jednym złożu, z adsorpcją w drugim.
- Wielostopniowy system adsorpcyjny umożliwia dzięki takiemu działaniu wykorzystanie źródła ciepła o jeszcze niższej temperaturze rzędu  $50^{\circ}\text{C}$  i mniej.

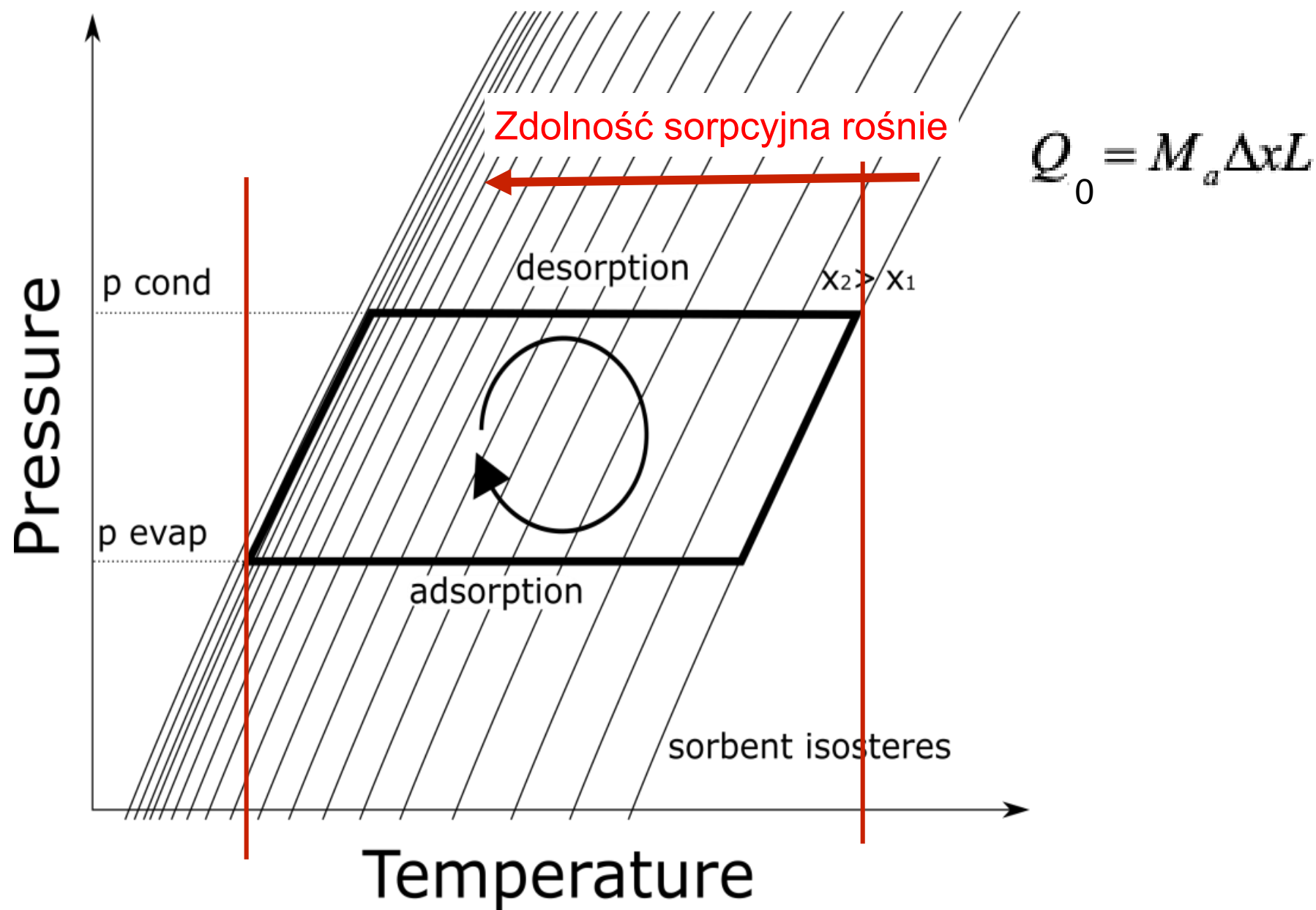
# Schemat systemu wielostopniowego



Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.

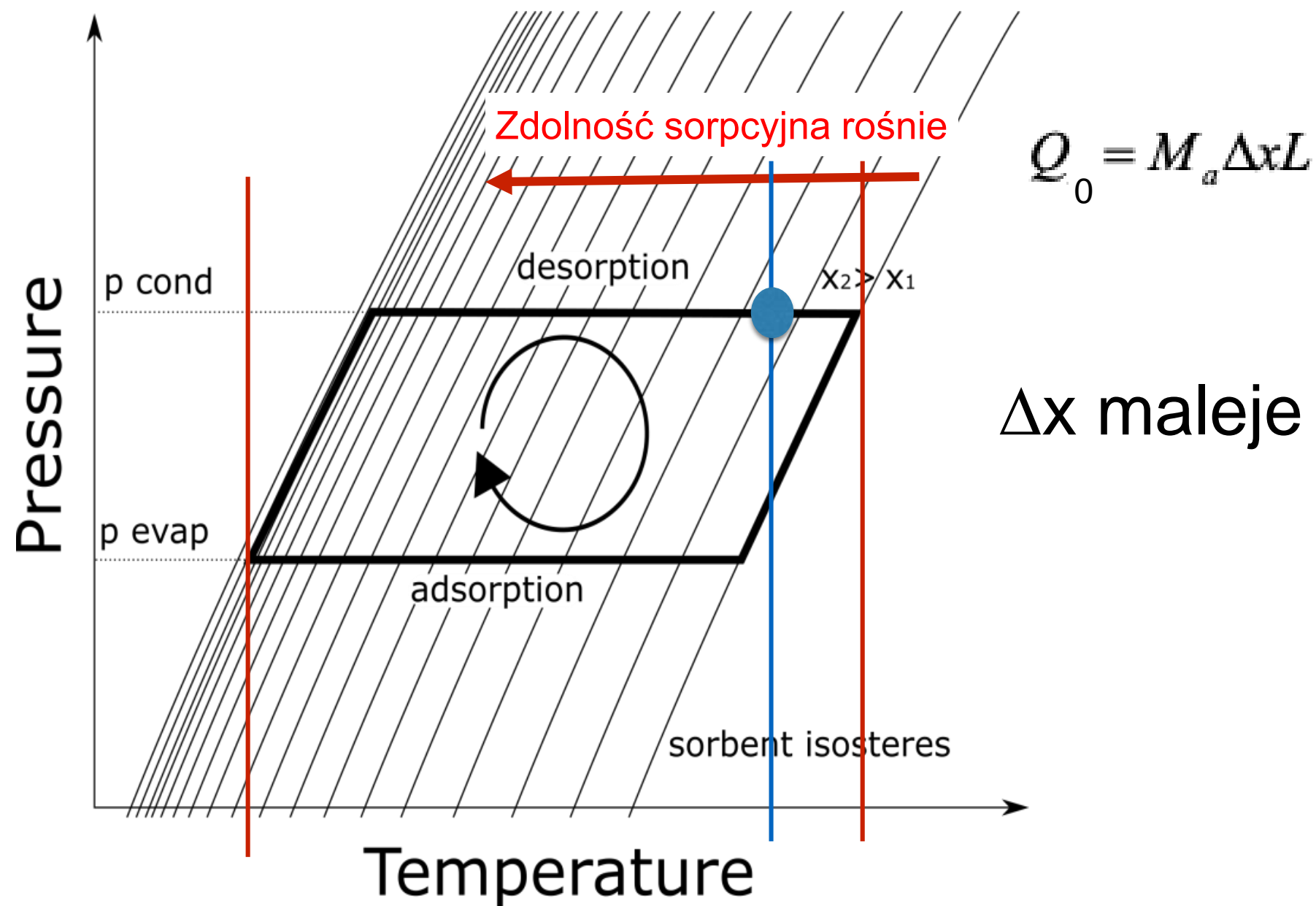


# Zasada działania



Rys. Wykres  $p(T)$ .

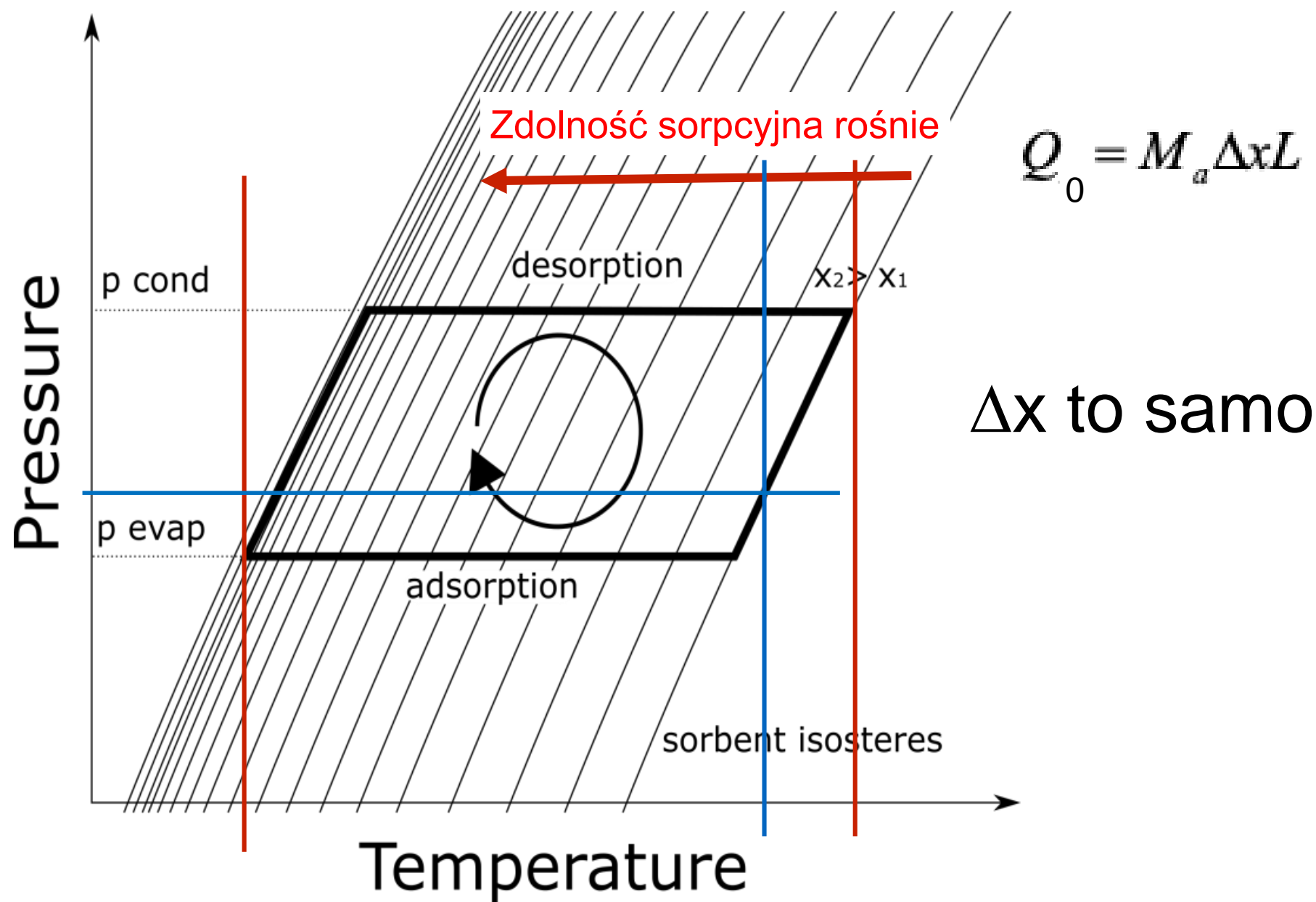
# Zasada działania



Rys. Wykres  $p(T)$ .



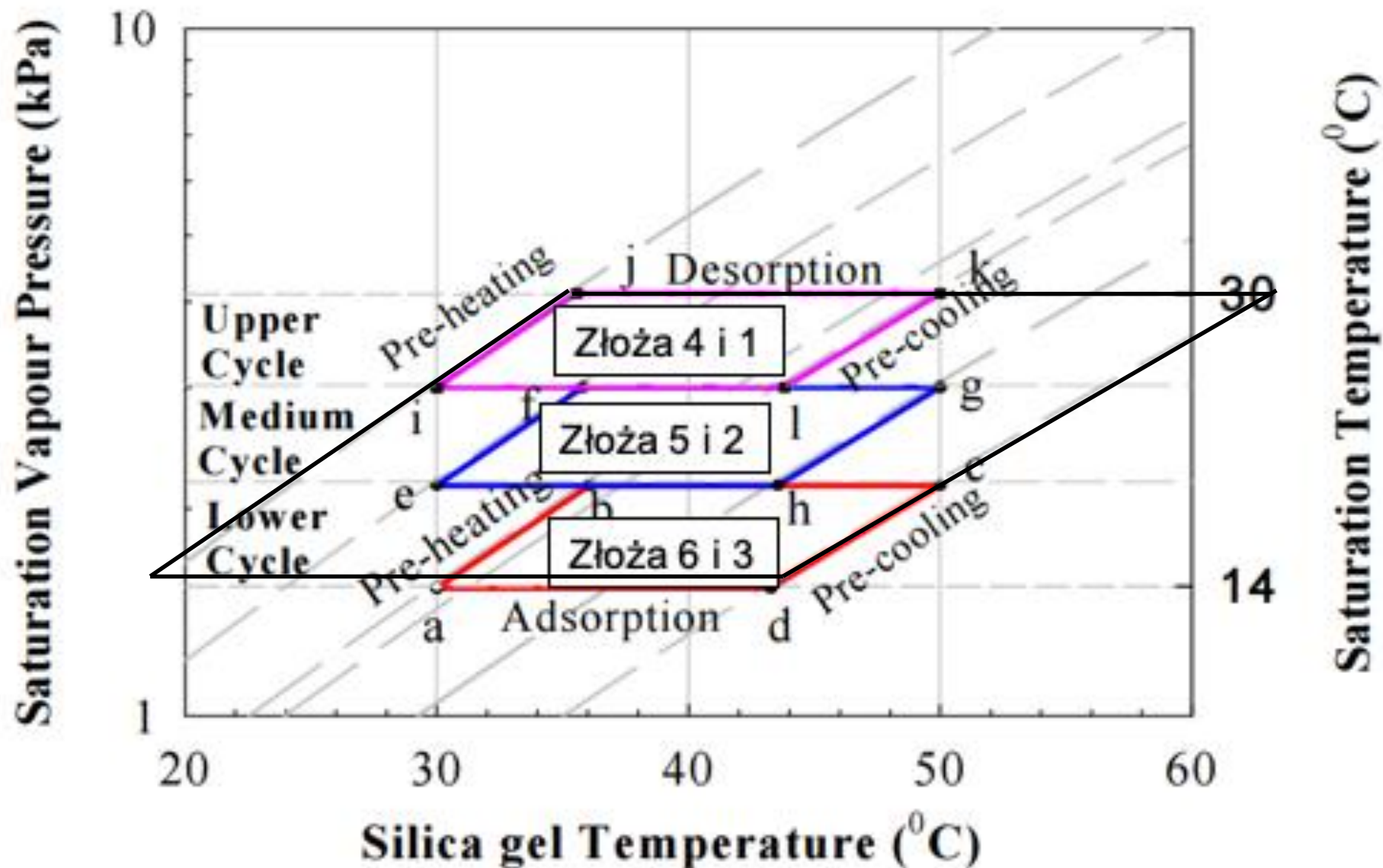
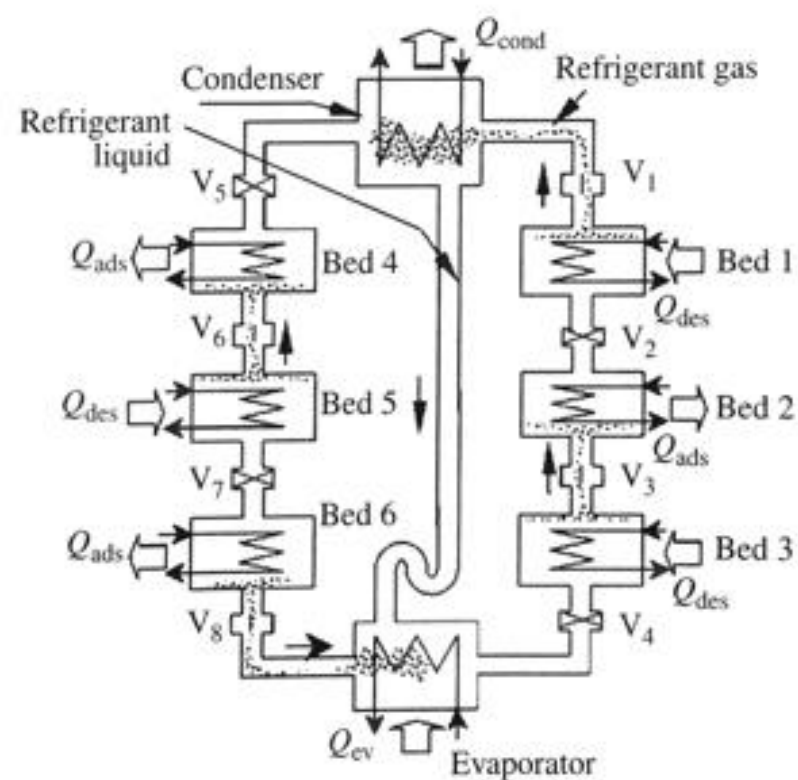
# Zasada działania



Rys. Wykres p(T).



# Wykres p-T dla układu wielostopniowego

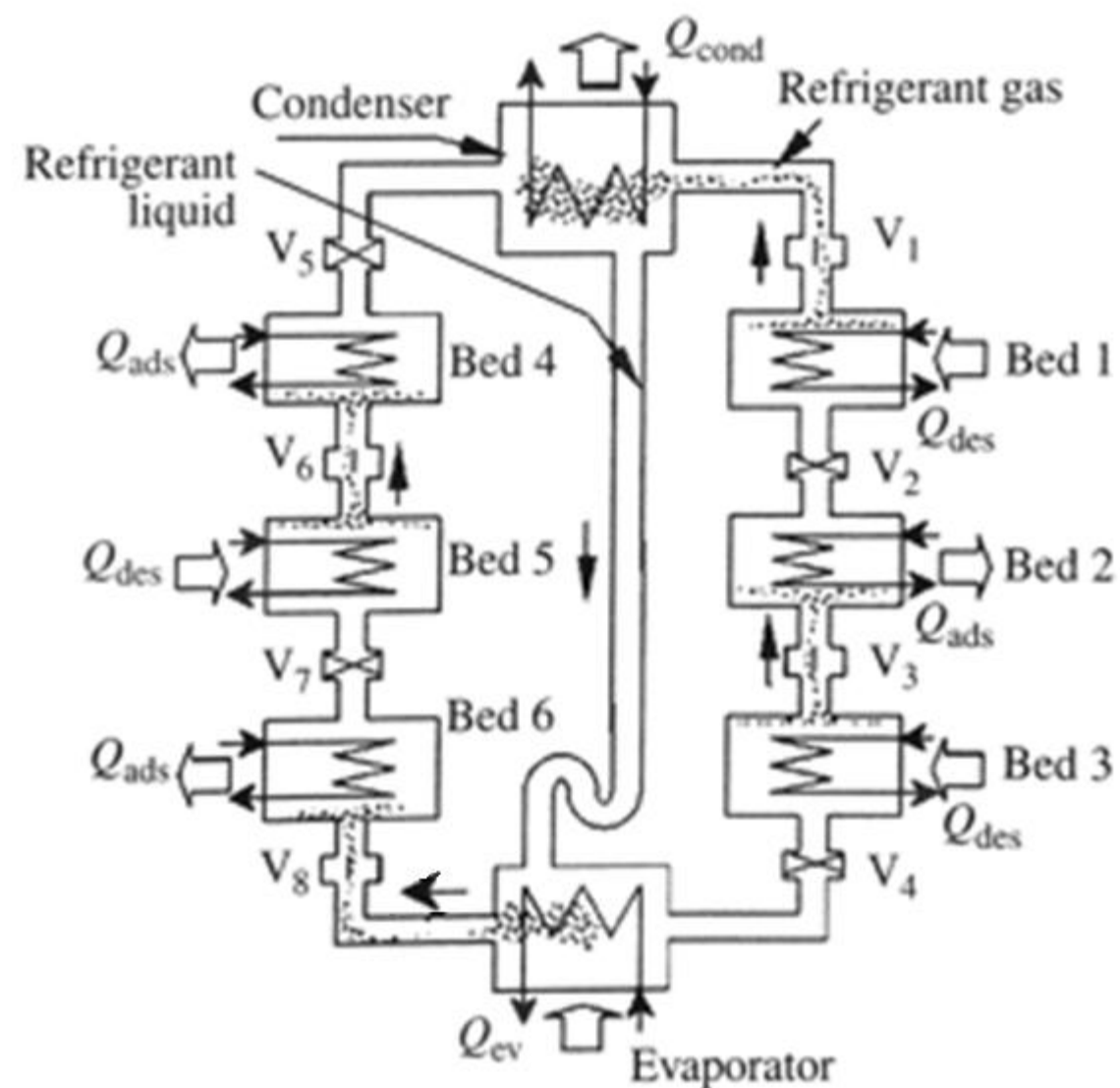


Rys. Układ wielostopniowy na wykresie p-T.



# Zasada działania

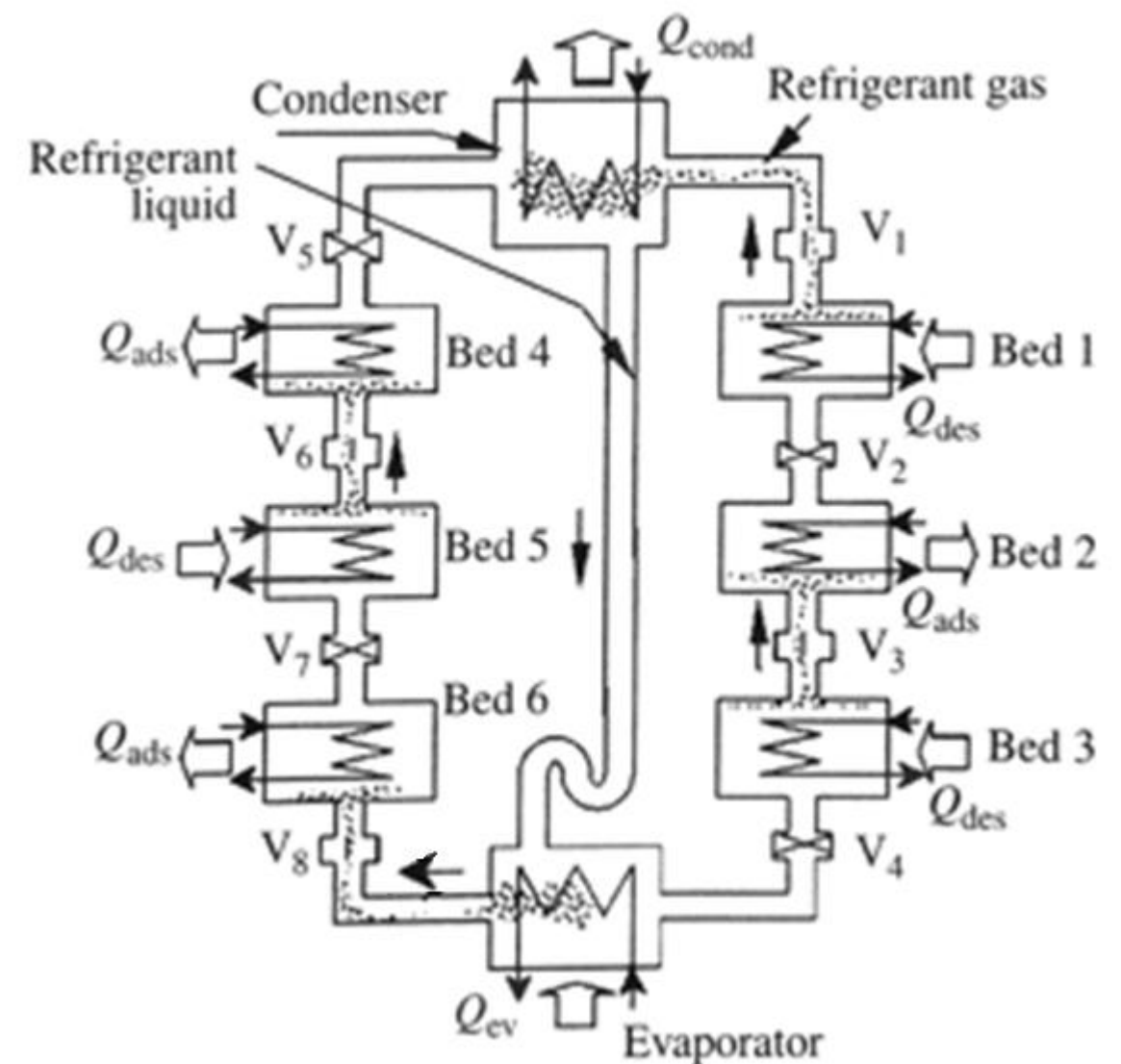
- W przykładowym układzie zbudowanym z sześciu złożeń można zrealizować **trójstopniowy** system adsorpcyjny.
- Efekt chłodniczy jest produkowany jedynie podczas pracy adsorberów 3 oraz 6 (na rysunku).
- Adsorbery 1, 2, 4 oraz 5 pełnią funkcję swego rodzaju skraplaczy – złożenie 2 jest skraplaczem dla złoża 3, złożenie 1 dla złoża 2, itd.



Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.

# Zasada działania

- Złoże 6 w przedstawionym przykładzie połączone jest z parowaczem, chłodzone za pomocą zewnętrznego źródła (np. wieży chłodniczej) i adsorbuje pary czynnika z parowacza – zawór  $V_8$  jest otwarty. Parujący czynnik generuje efekt chłodniczy.
- Złoże 4 (ochładzane) połączone jest ze złożem 5 (ogrzewanym) i pracuje jako “skraplacz/adsorber”.



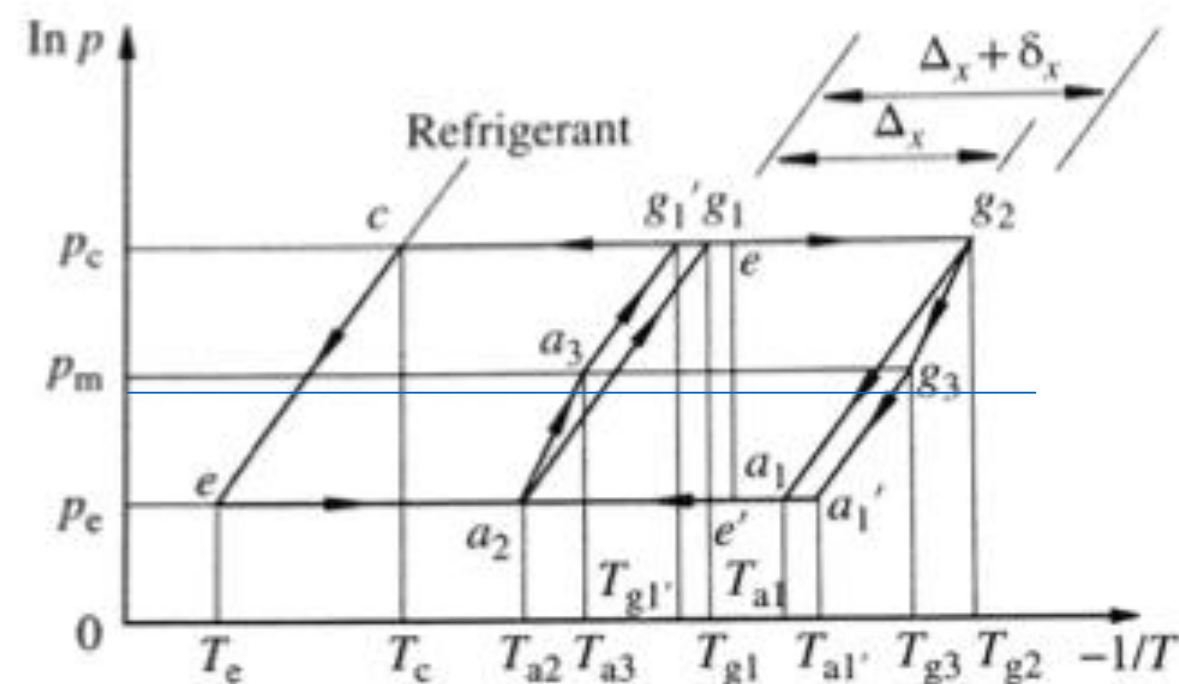
Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.

# Zasada działania

- Użycie złoża 2 jako “skraplacza” dla złoża 3 oznacza niższe ciśnienie pośrednie  $p_m$  dla złoża 3 ponieważ ciśnienie w złożu 2 jest dużo niższe niż ciśnienie w skraplaczu.
- Ze względu na zasadę równości zmiany zdolności adsorpcyjnej...

$$\delta x_{a2-a3} = \delta x_{g2-g3}$$

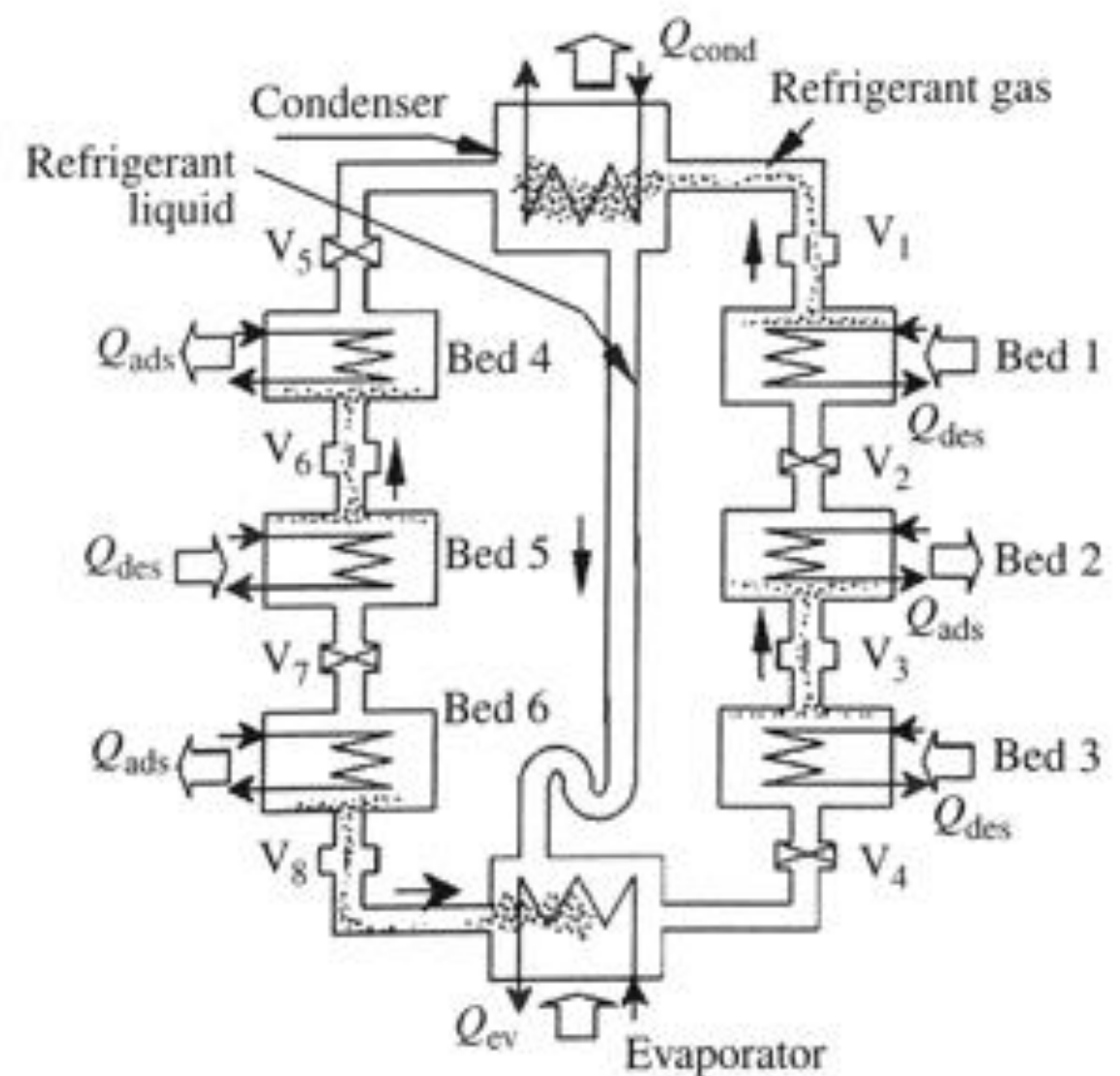
temperatura źródła używanego do regeneracji złoża 3 również będzie niższa.



Rys. wykres systemu adsorpcyjnego.

# Zasada działania

- Sytuacja wyglądałaby identycznie w przypadku złoża 1 oraz złoża 2. Temperatura źródła ciepła, przy desorpcji złoża 2 również będzie niższa niż byłoby to wymagane w układzie jednostopniowym.
- Złoże 1 adsorbuje pary czynnika ze złoża 2, w którym panuje większe ciśnienie niż w parowniku. Dlatego efektywna zdolność adsorpcyjna złoża 1 będzie większa.

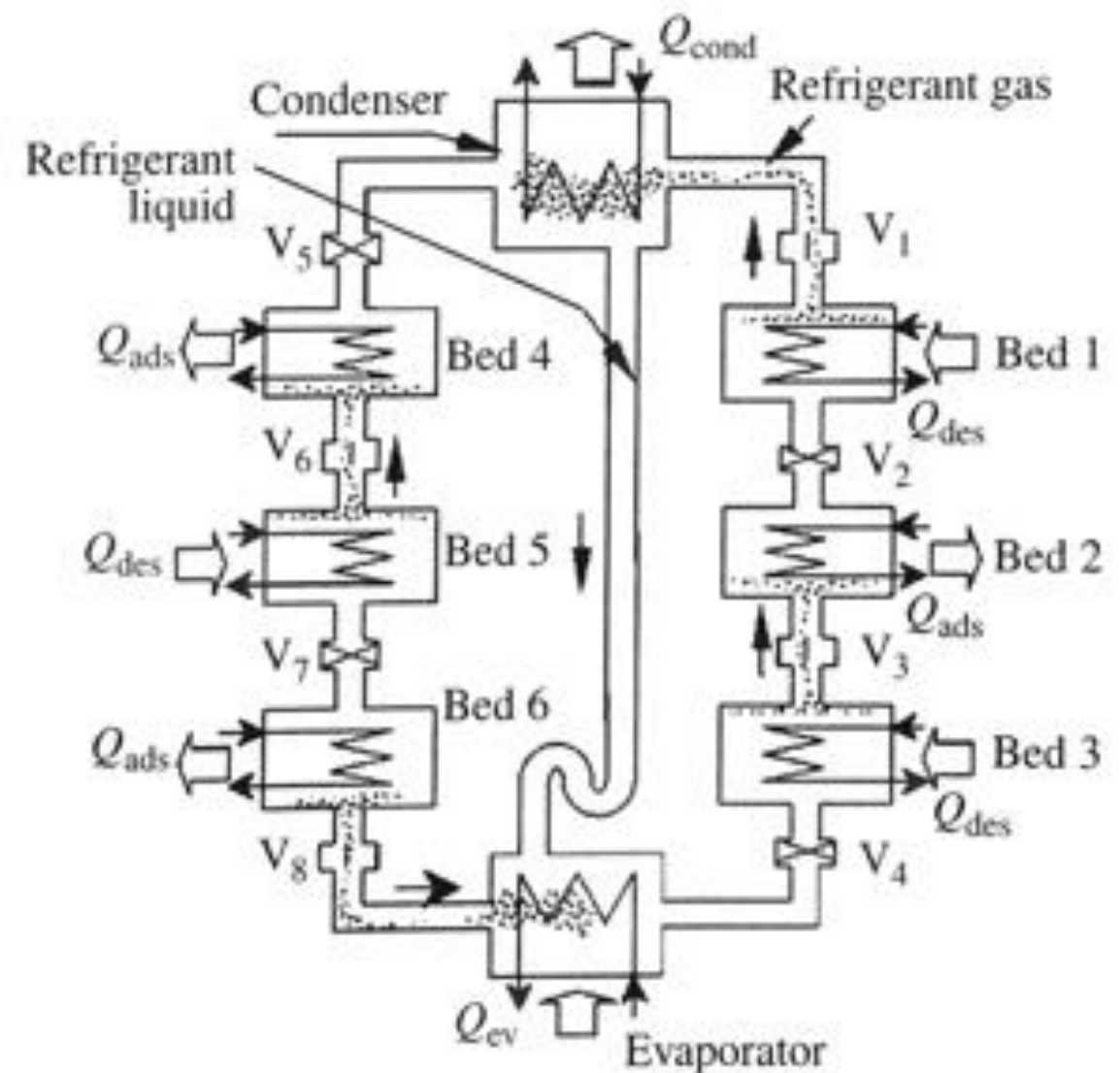


Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.



# Zasada działania

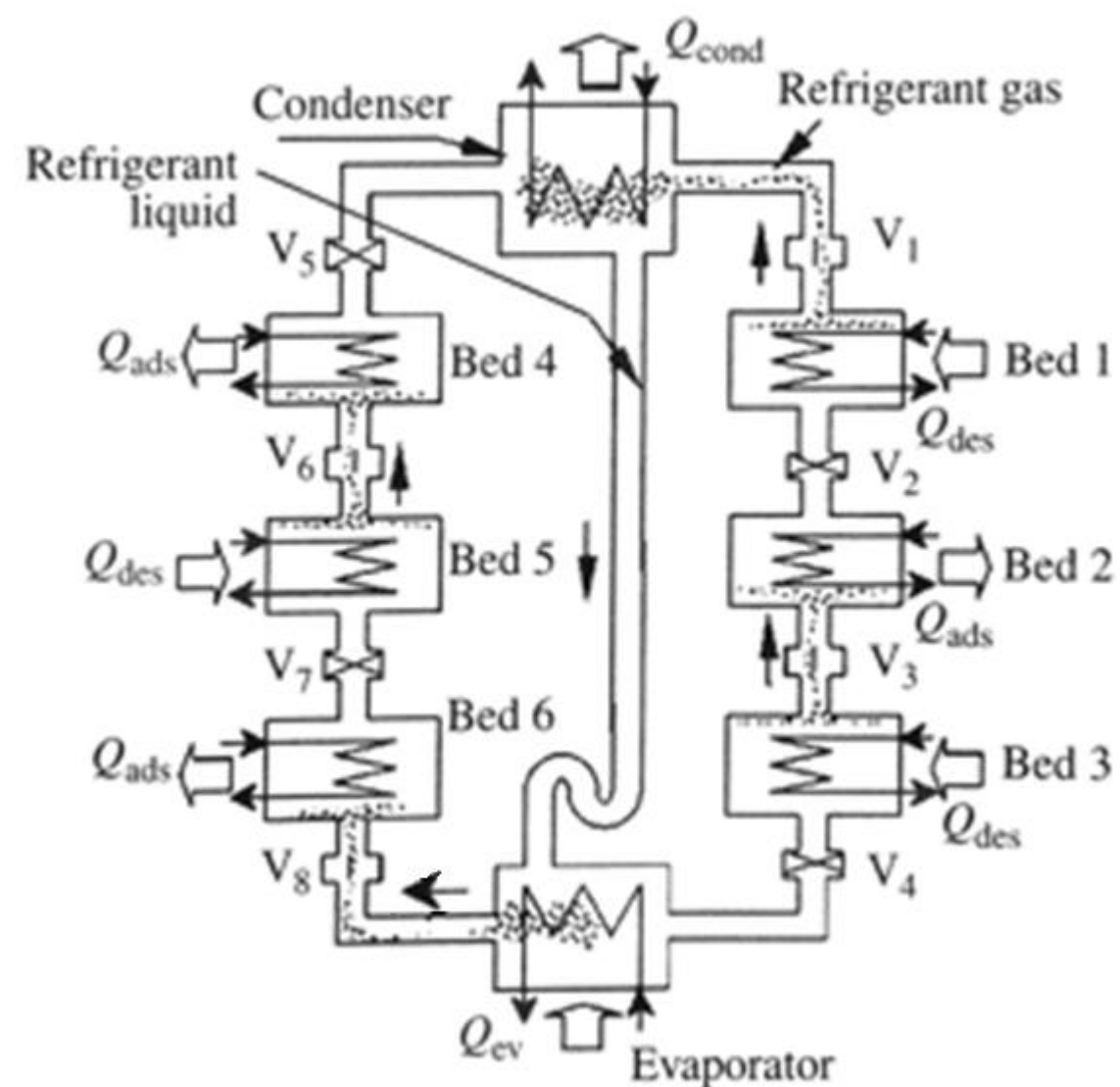
- Z tego samego powodu, tj. równości zdolności adsorpcyjnej, temperatura regeneracji złoża 1 również będzie zmniejszona.



Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.

# Zasada działania

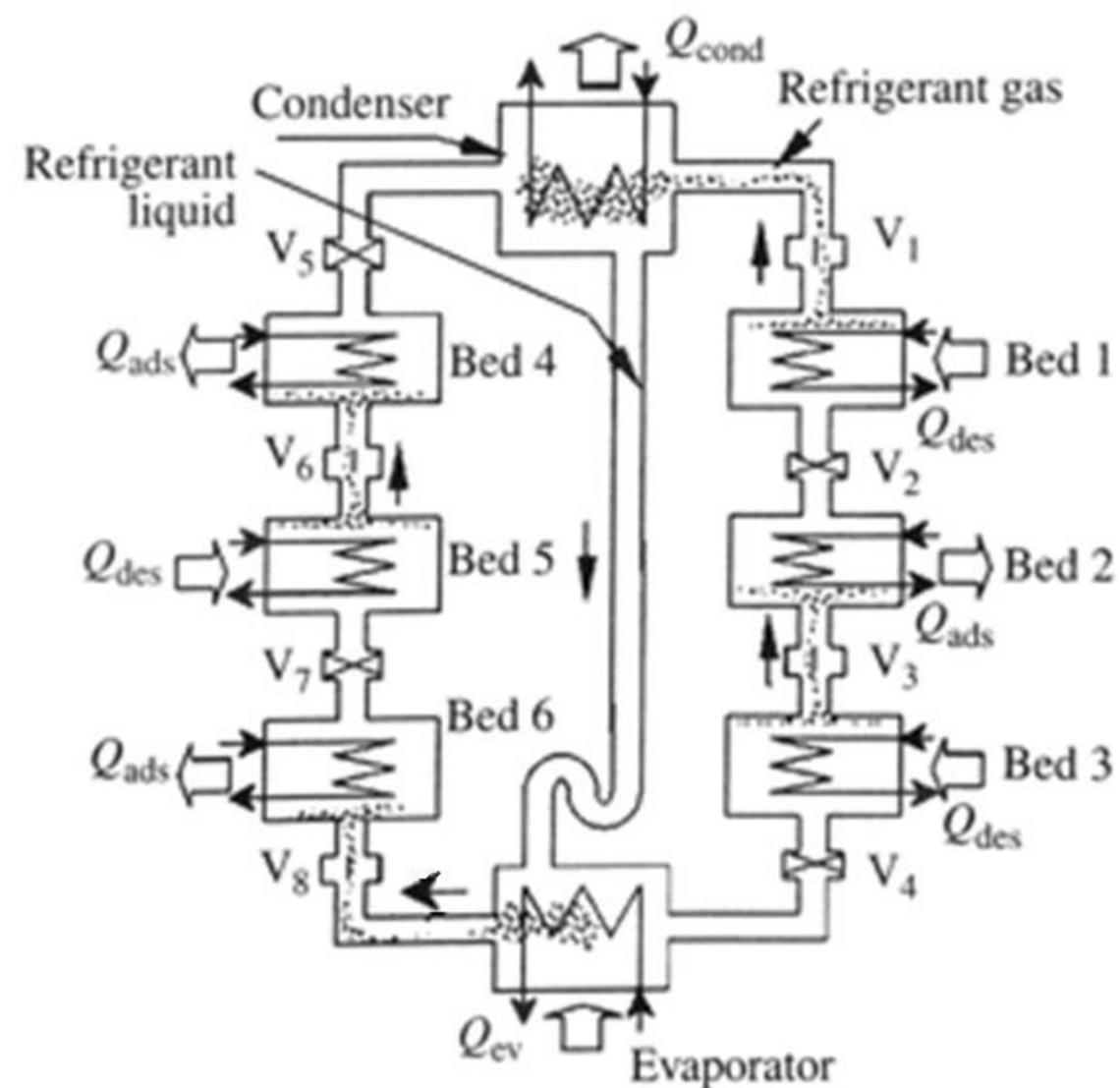
- Kiedy proces pokazany na rysunku się zakończy, złożo 3 zostanie poddane chłodzeniu i podłączone do parownika (zawór  $V_4$ ), a złożo 4 zostanie poddane ogrzewaniu przez górne źródło oraz podłączone do skraplacza (zawór  $V_5$ ).



Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.

# Zasada działania

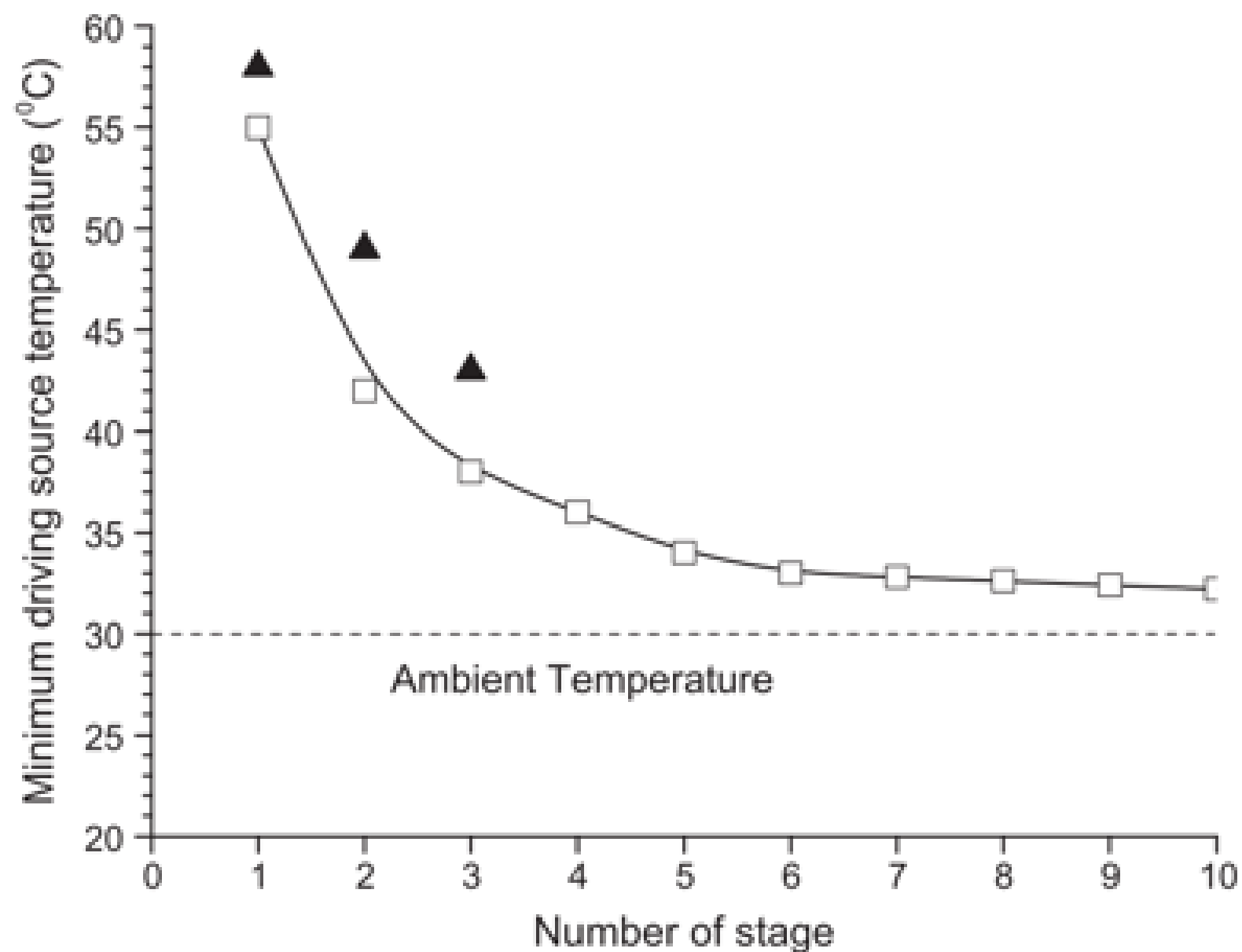
- Podsumowując – praktycznie wszystkie obiegi adsorpcyjne wymagają temperatury nie mniejszej niż  $60^{\circ}\text{C}$ . Systemy wielostopniowe umożliwiają wykorzystanie temperatury rzędu  $50^{\circ}\text{C}$ .
- Termodynamicznie i ekonomicznie nie jest uzasadnione stosowanie więcej niż trzech stopni.



Rys. Schemat wielostopniowego systemu adsorpcyjnego.



# Temperatury w systemie wielostopniowym



Rys. Minimalna temperatura zasilania systemu sorpcyjnego w układzie kaskadowym w funkcji ilości stopni.





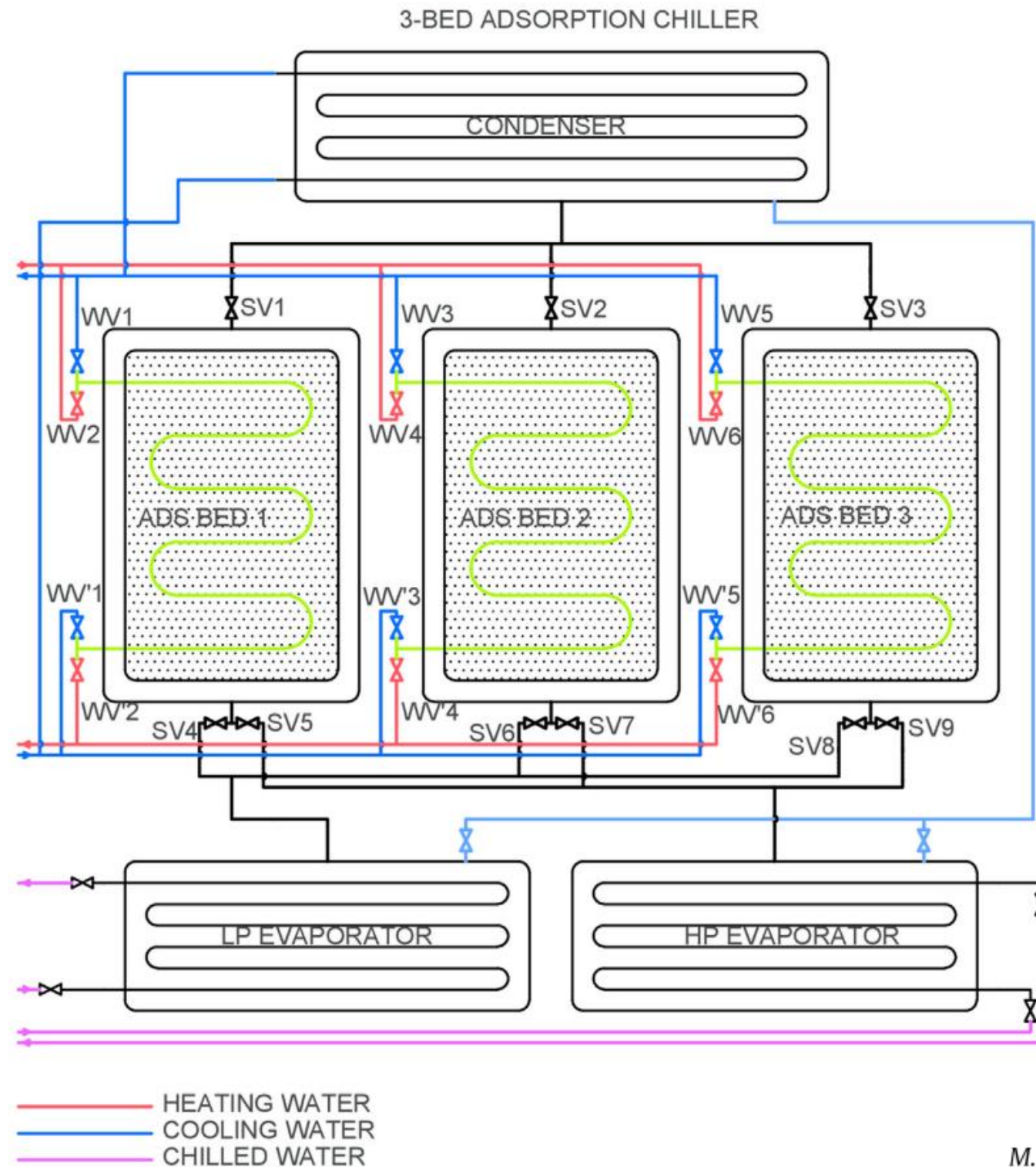
Politechnika Wroclawska

# Inne konstrukcje chłodziarek

Układ z 2 parowaczami: Chłodziarka 3 złożowa  
Odparowanie w różnych ciśnieniach

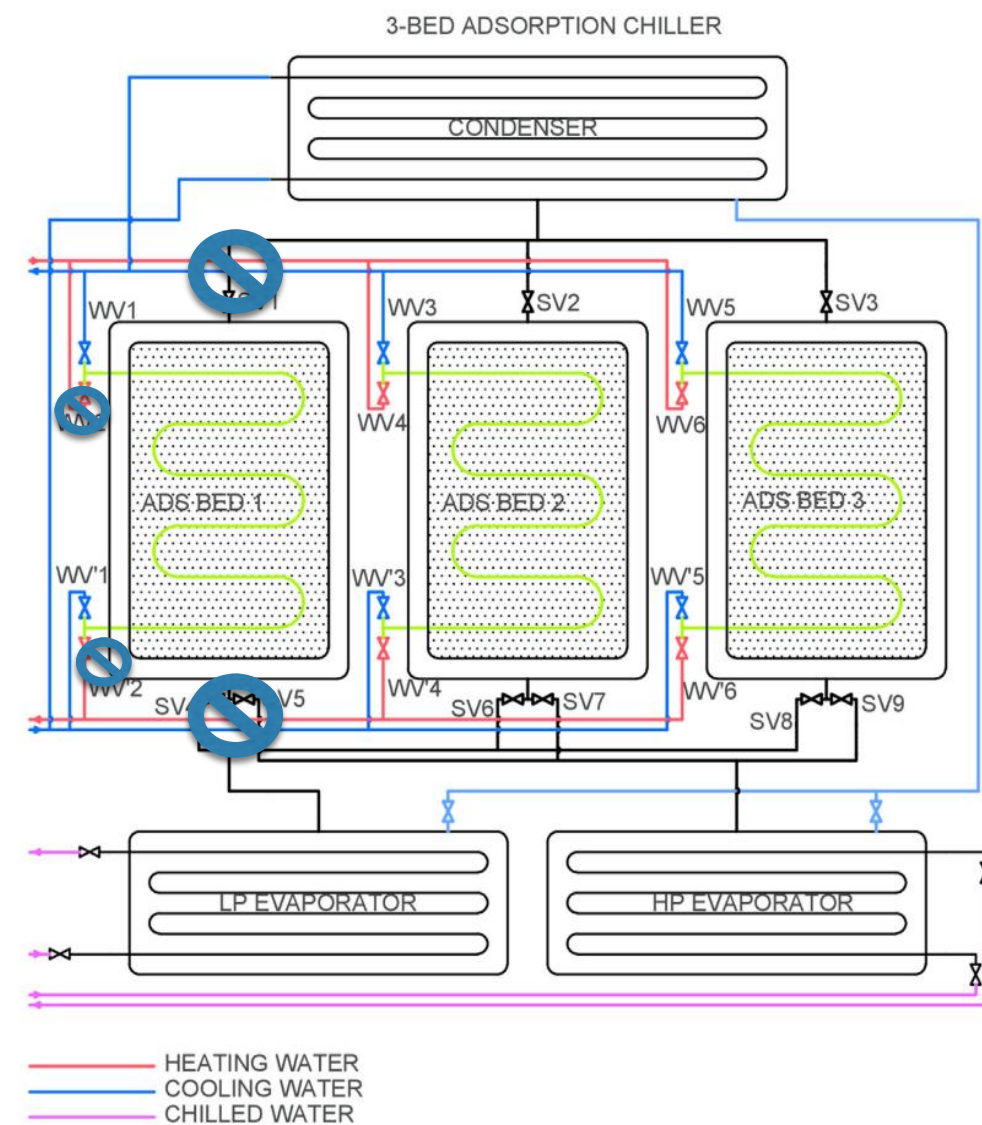
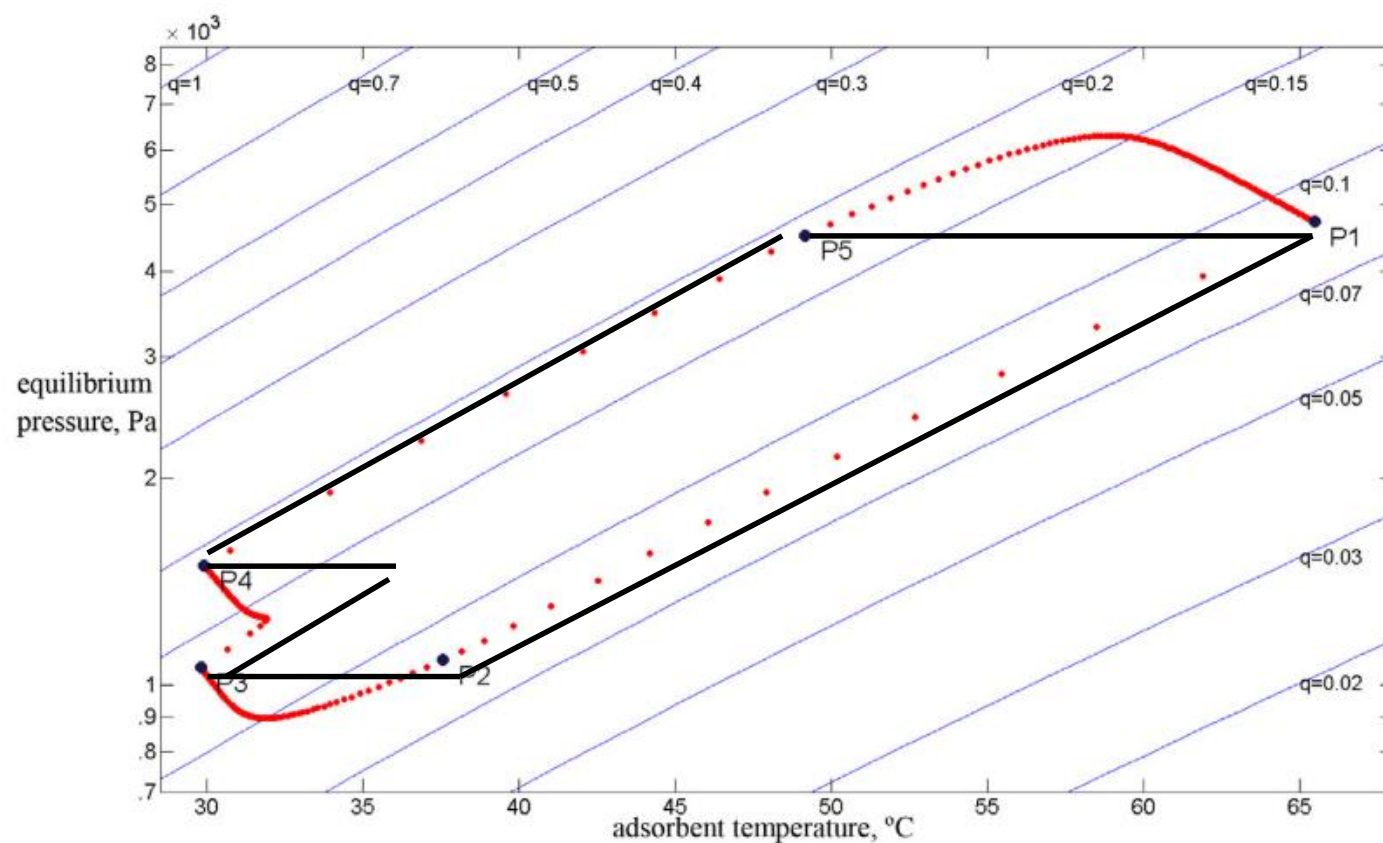


# Schemat układu z 2 parowaczkami



# Zasada działania

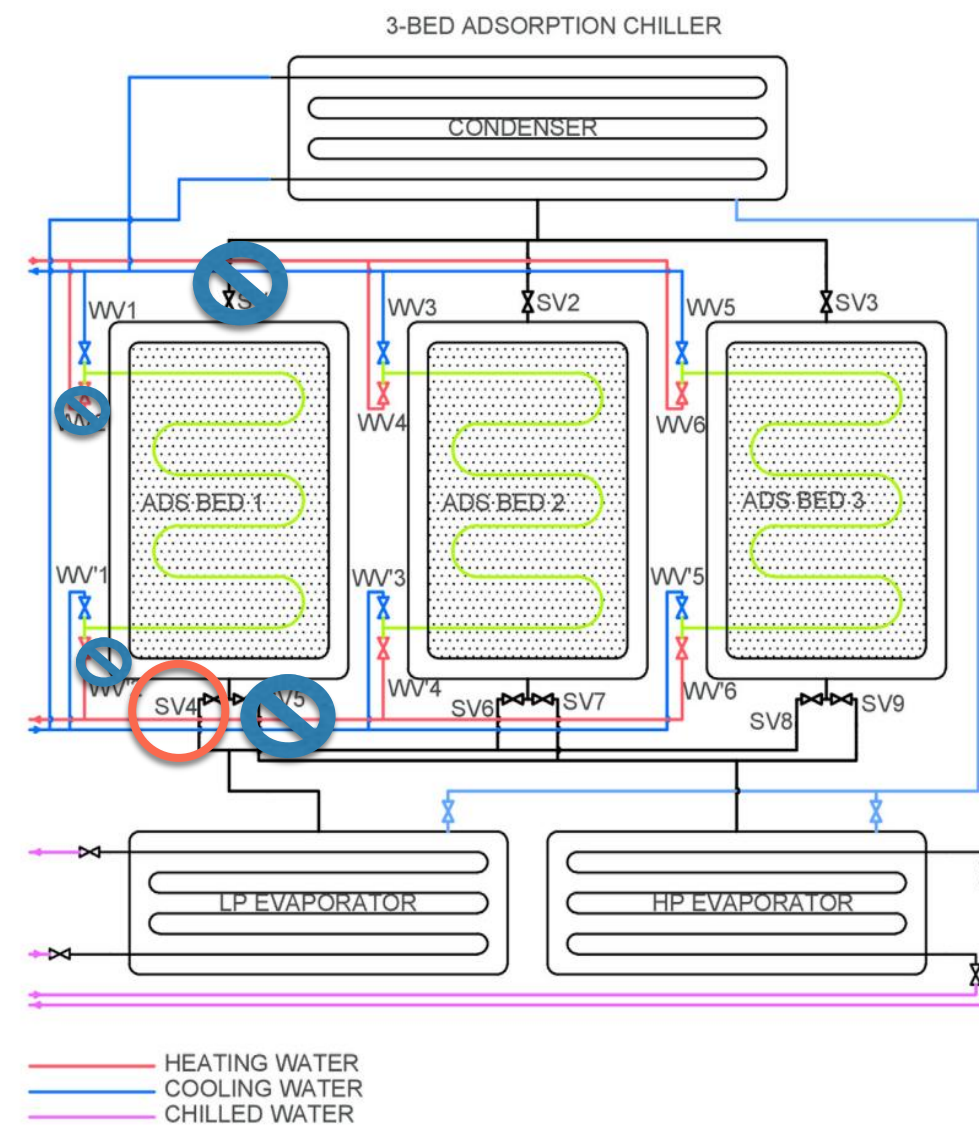
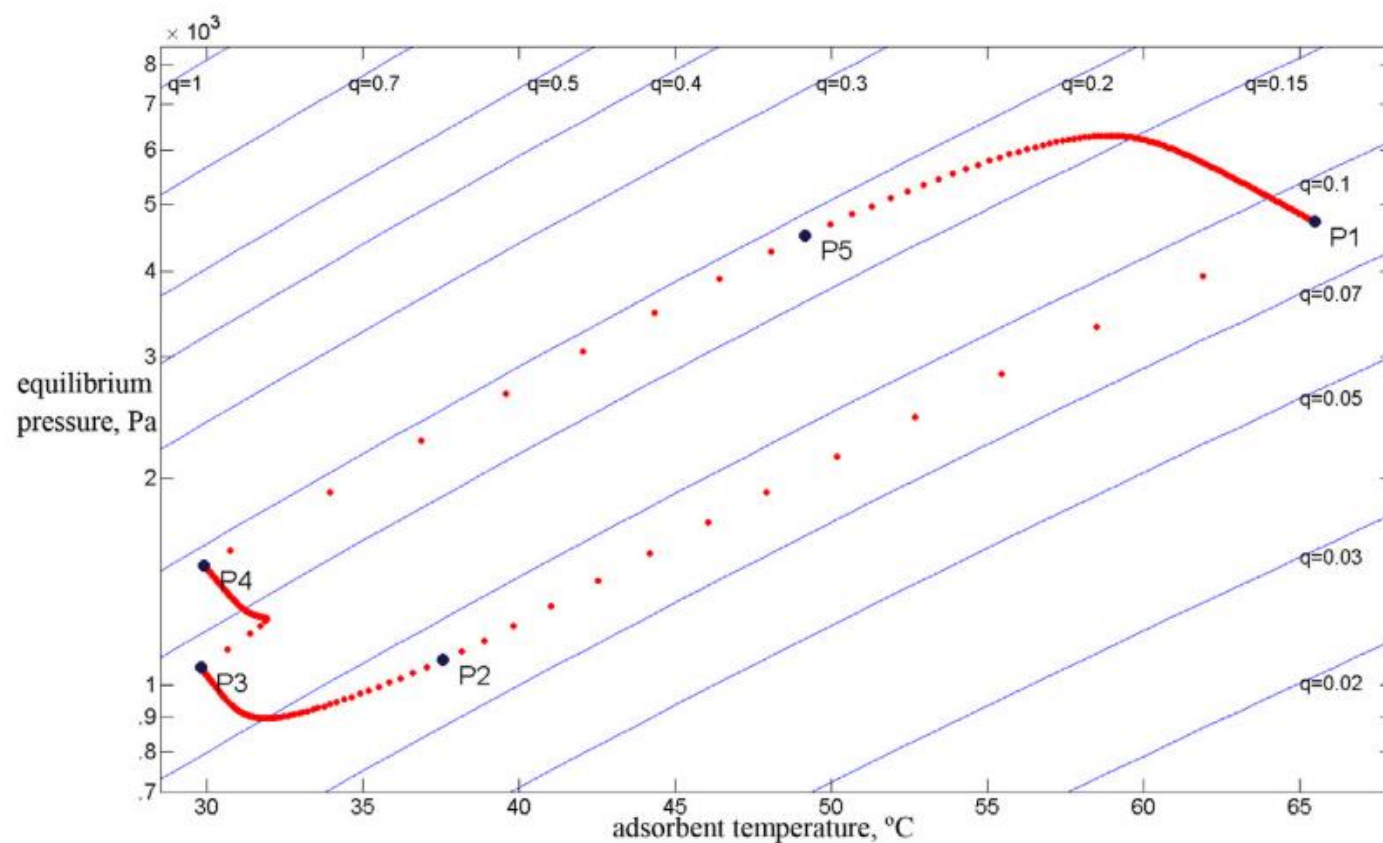
- Pełny cykl składa się z 3 faz.
- 1 faza to chłodzenie izosteryczne jednego ze złożeń (P1 -> P2). Np. złoża 1.





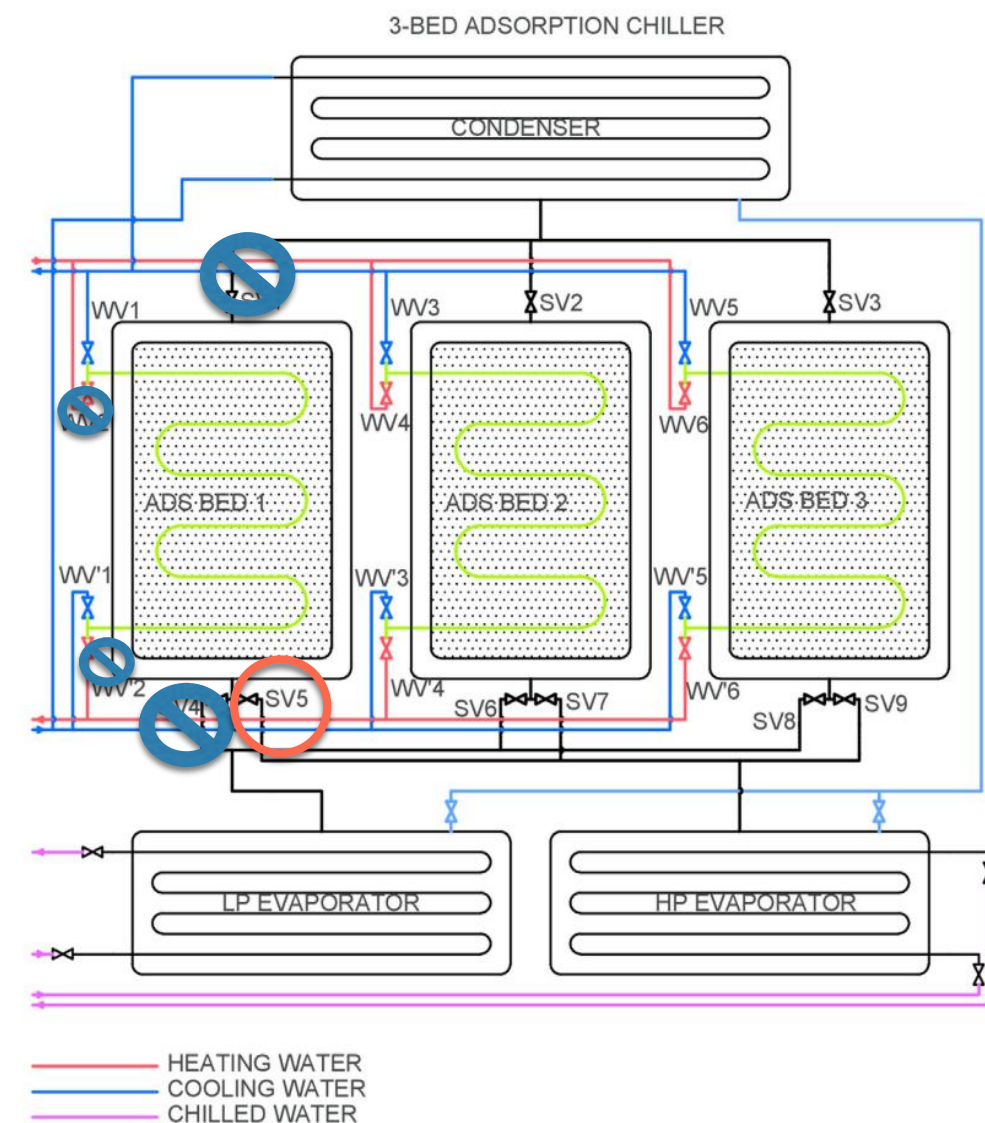
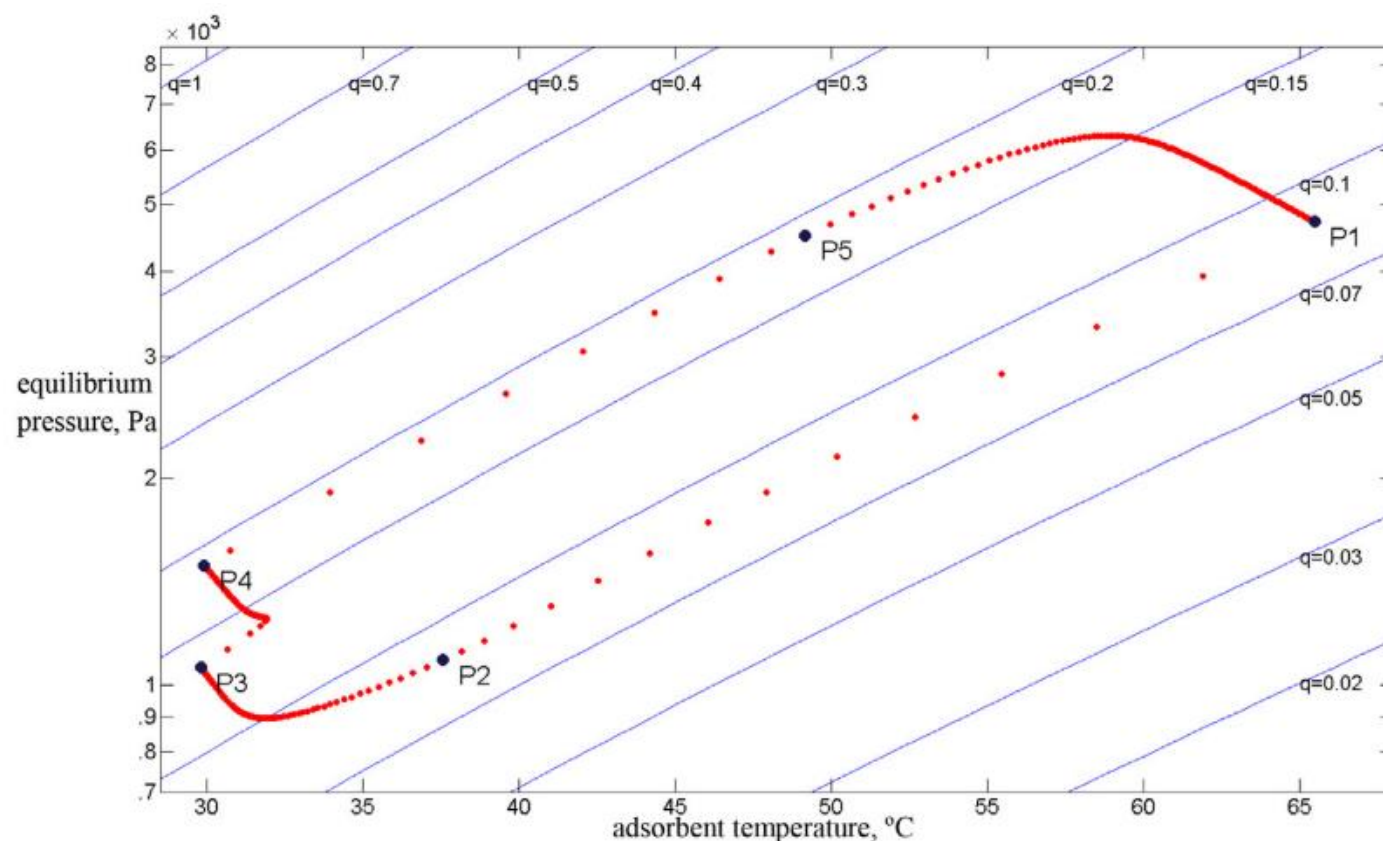
# Zasada działania

- Gdy zostanie osiągnięte ciśnienie niższe niż w parowaczu niskociśnieniowym (LP) otwiera się zawór SV4 (P2 -> P3).



# Zasada działania

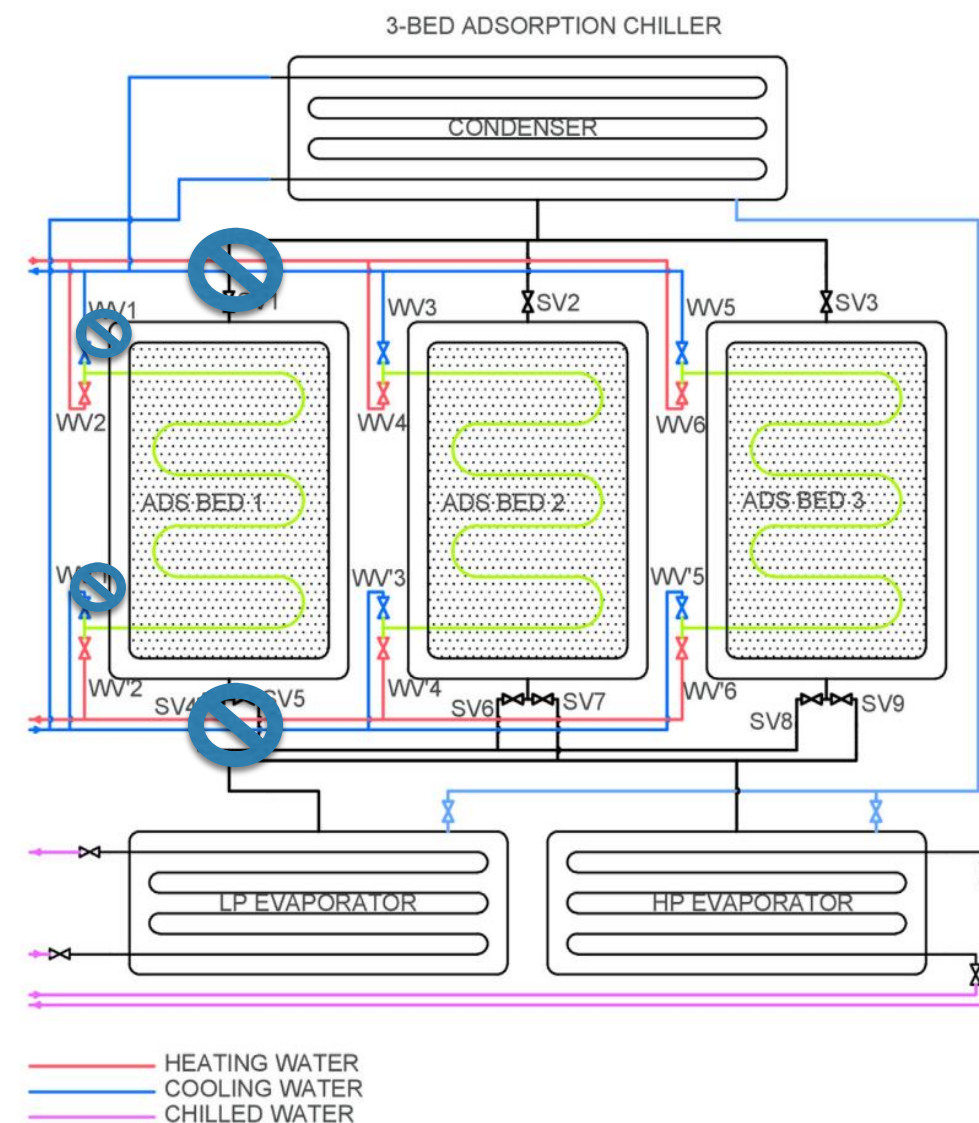
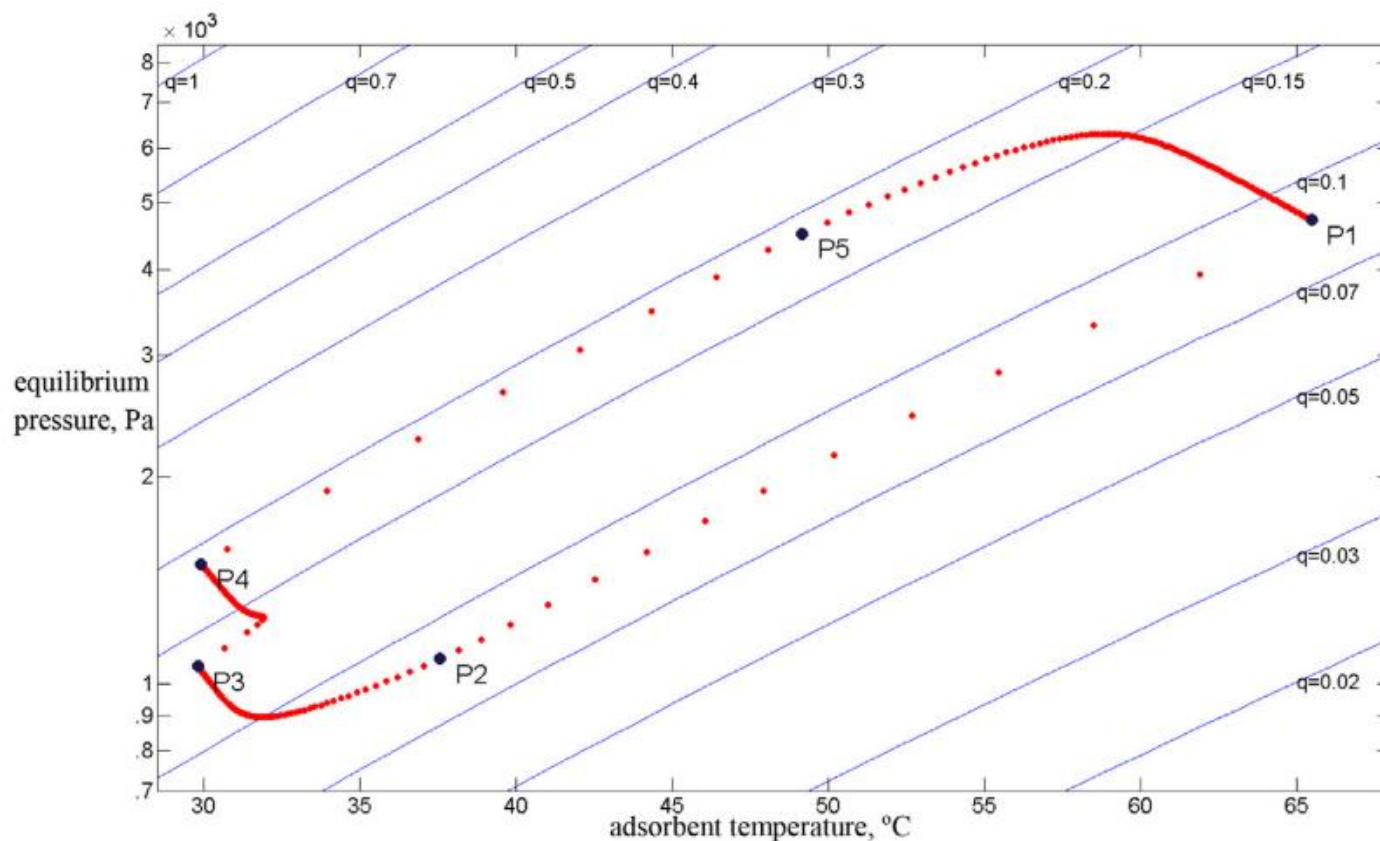
- Gdy nasycenie złoża czynnikiem zbliży się do maksimum dla danego ciśnienia zawór SV4 zostanie zamknięty, a otwarty SV5 (P3 -> P4)





# Zasada działania

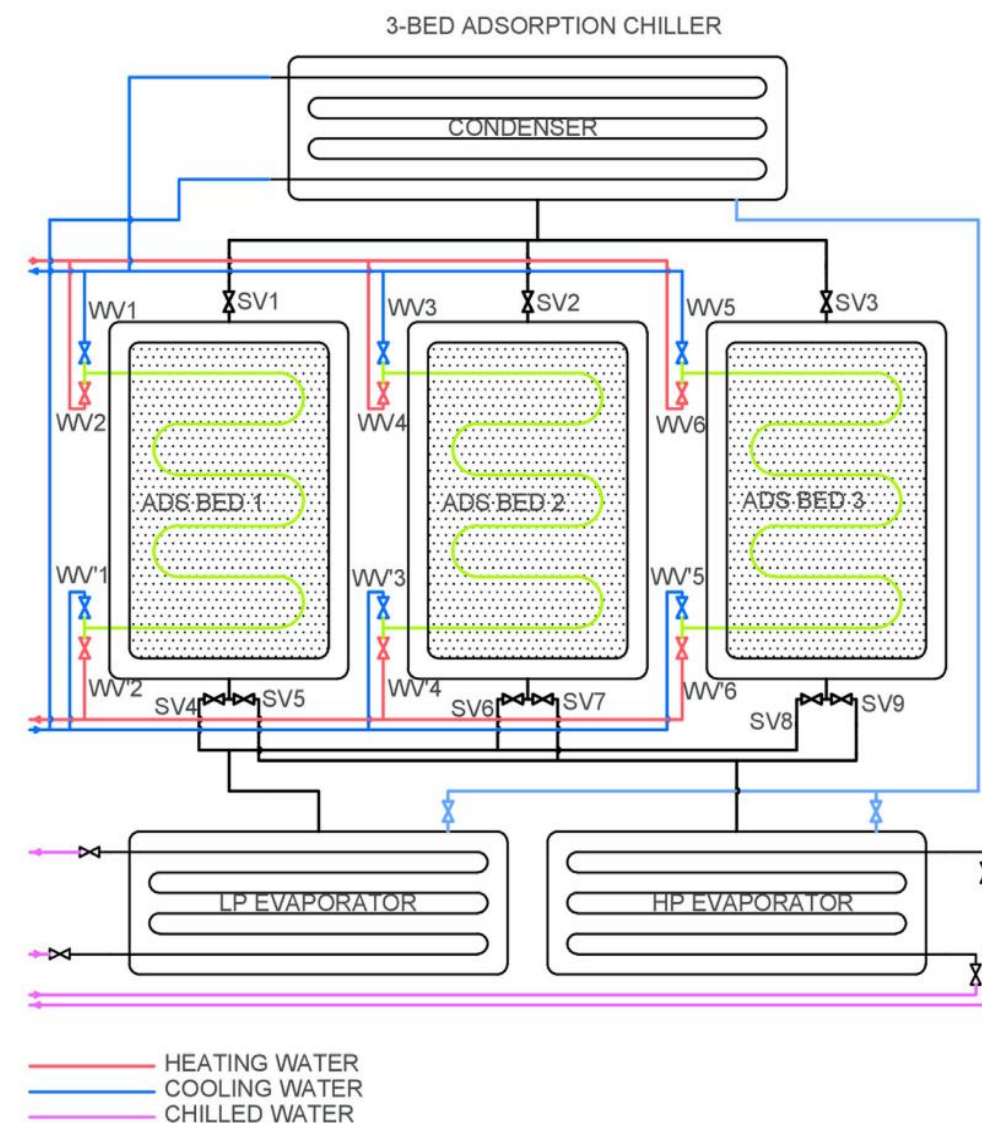
- Gdy nasycenie złoża osiągnie maksimum dla wyższego ciśnienia wszystkie zawory zostają zamknięte i złoża zaczyna być ogrzewane (P4->P5)





# Zasada działania

- Chłodzone medium (np. woda lodowa) przepływa najpierw przez parowacz wysokociśnieniowy (temp. odparowania zwykle około  $12^{\circ}\text{C}$ ), a następnie przez parowacz niskociśnieniowy (temp. odparowania zwykle około  $5^{\circ}\text{C}$ ).







# Zalety i wady

- + Zwiększenie wydajności chłodniczej poprzez zwiększenie zdolności adsorpcyjnej źródła;
- + W konsekwencji zwiększenie COP;
- Zwiększenie skomplikowania układu;
- **Wzrost COP bywa niewspółmierny do wzrostu kosztów produkcji.**



Politechnika Wroclawska

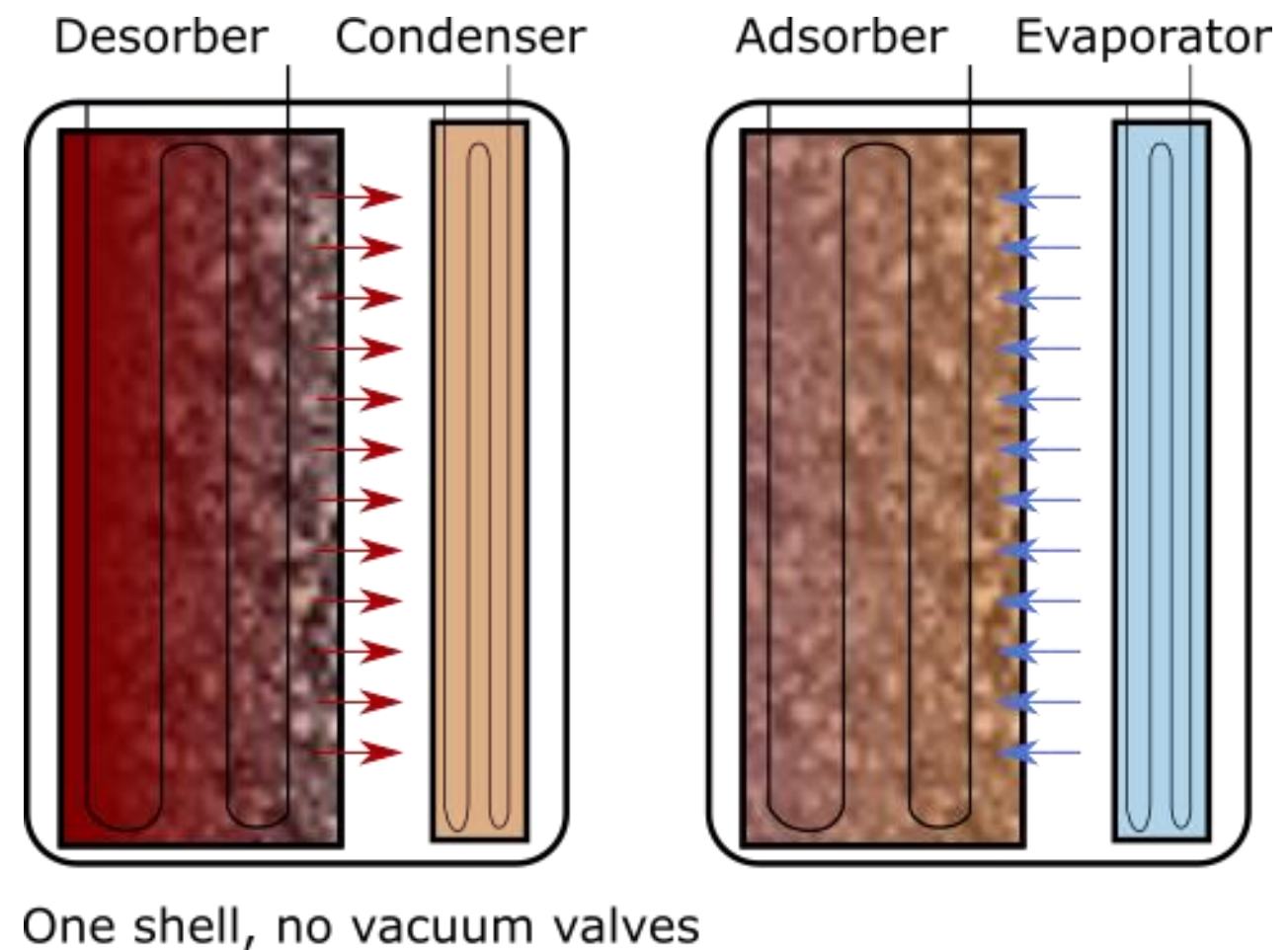
# Inne konstrukcje chłodziarek

Układ zintegrowany

Patent firmy Farhenheit AG (wcześniej Sortech)

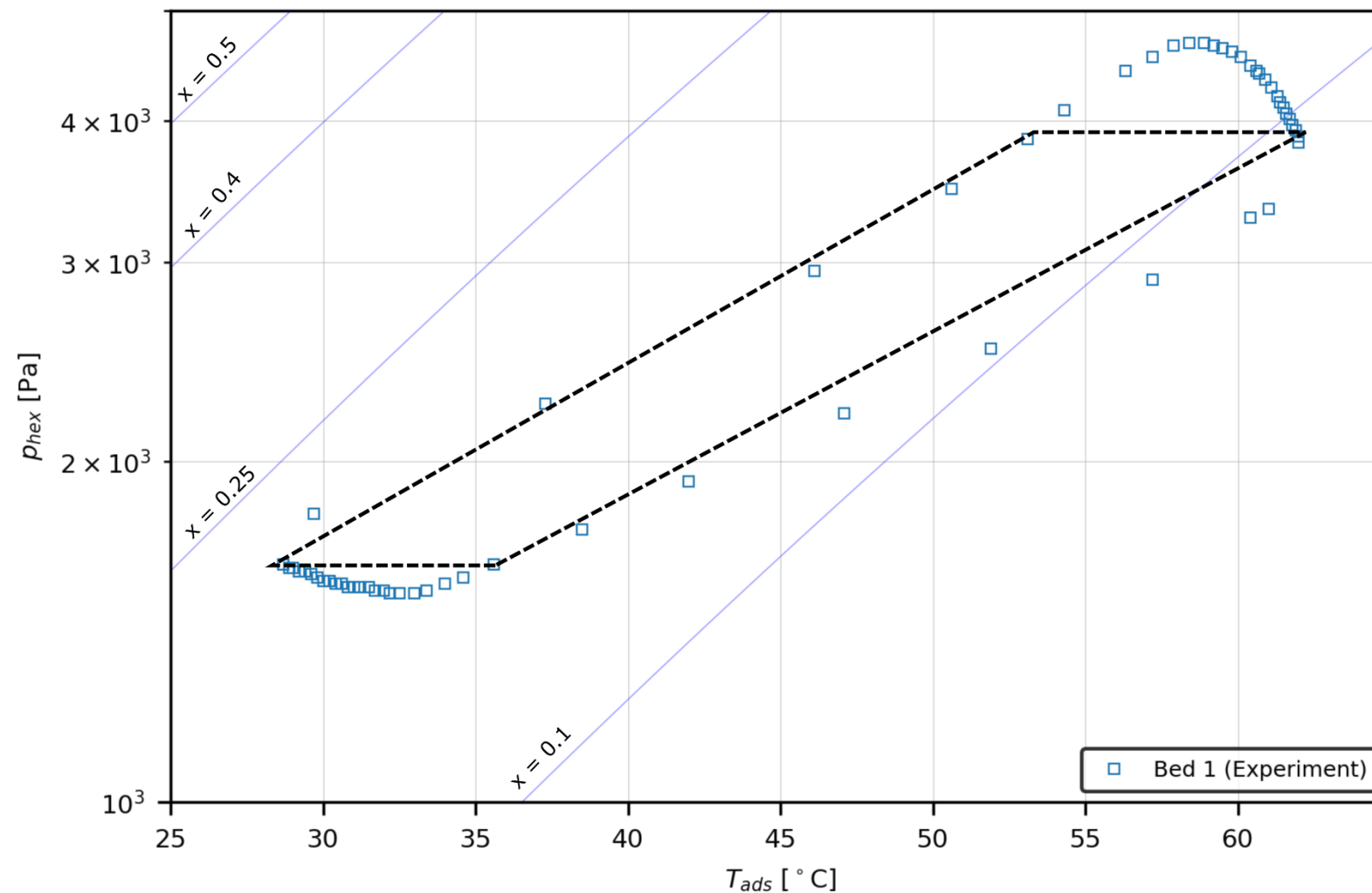
# Zasada działania

- Złoże znajduje się w jednej hermetycznej obudowie z wymiennikiem ciepła.
- W zależności od tego czy złoże pracuje jako adsorber czy desorber to wymiennik przyjmuje zadanie skraplacza lub parowacza



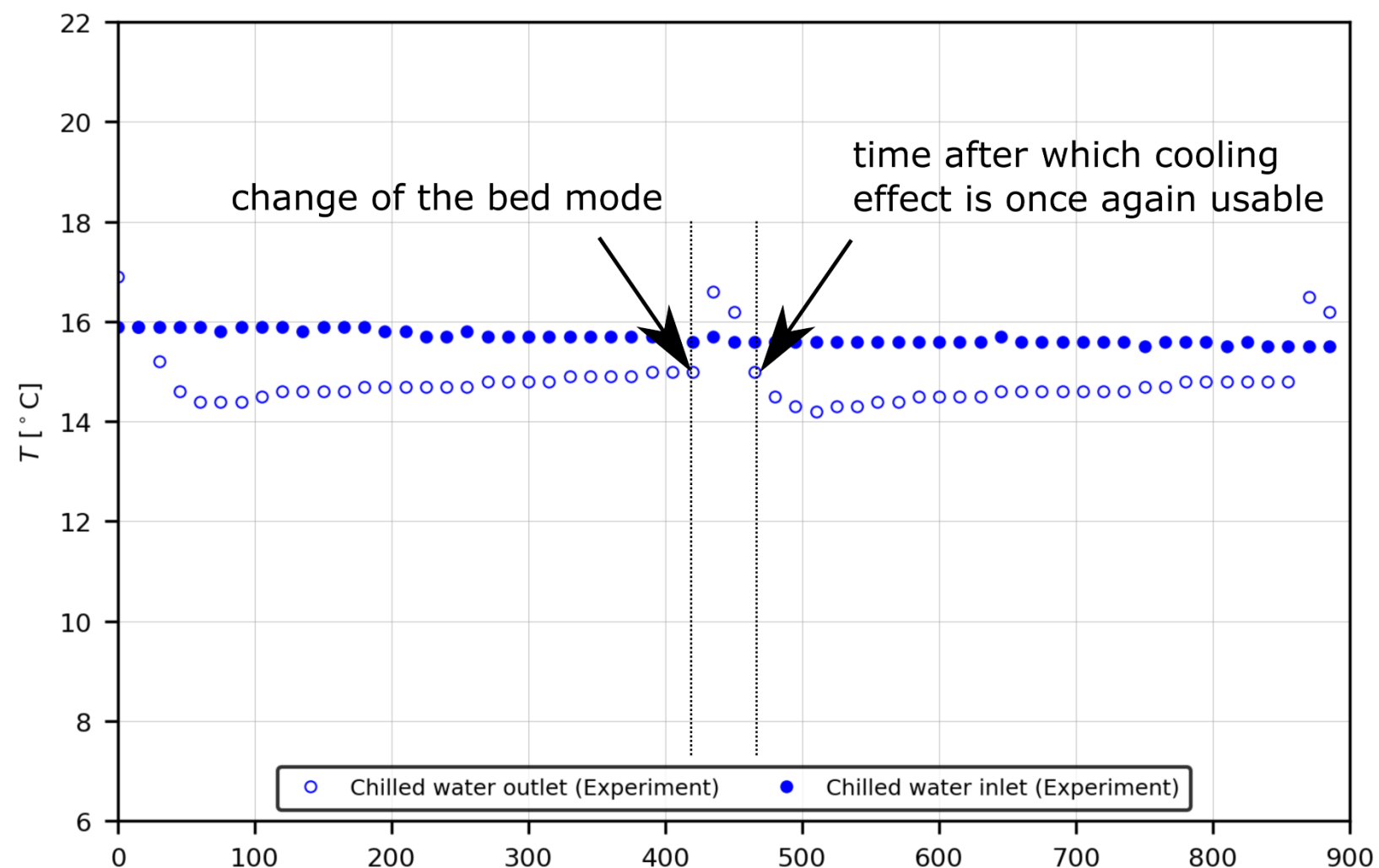
# Zasada działania

- Z powodu zamknięcia wymiennika w obudowie ze złożem nie ma fazy pośredniej



# Wady i zalety

- + brak bardzo drogich zaworów działających w próżni
- Zmiany roli wymienników ciepła powodują ich wygrzanie lub wychłodzenie (zmniejszenie COP)





Politechnika Wroclawska

# Modelowanie

Modelowanie dynamiki dwuadsorberowego systemu  
adsorpcyjnego



# Bilans energii złoża adsorpcyjnego

Bilans energii dla złoża oblicza się następująco:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left\{ \left[ M_a (c_a + c_{Lc} \cdot x) + c_{mccu} M_{mccu} + c_{mal} M_{mal} \right] \cdot T_a \right\} = \\ = M_a H_{st} \frac{dx}{dt} + (1 - \delta_1) c_{Lv} M_a (T_e - T_a) + m_w c_{p,water} (T_{ads,in} - T_{ads,out}) \end{aligned}$$

Gdzie:

- $M_a$  masa adsorbentu,  $M_{mal}$   $M_{mccu}$  masy elementów konstrukcyjnych
- $c_a$  ciepło właściwe adsorbentu,  $c_{Lv}$  adsorbentu parowego,  $c_{Lc}$  adsorbentu ciekłego,  $c_{p,water}$  cieczy grzewczej
- $T_e$  temperatura parowania
- $T_a$  temperatura złoża,  $T_{ads,in}$  oraz  $T_{ads,out}$  temperatury wlotowa i wylotowa cieczy grzewczej
- $H_{st}$  ciepło adsorpcji
- $m_w$  strumień masy cieczy grzewczej

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & \text{,desorpcja} \\ 0 & \text{,adsorpcja – pary czynnika przedostające się z parowacza} \end{cases}$$





# Równanie kinetyczne adsorpcji

Zmiana stężenia adsorbentu na adsorbencie opisana jest wzorem:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{15D_{s0}}{R_p^2} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) (x_{eq} - x)$$

Gdzie:

- $D_{s0}$  – współczynnik dyfuzji powierzchniowej
- $E_a$  – energia aktywacji
- $R_p$  – średnica ziarna adsorbentu
- $x_{eq}$  – stężenie równowagowe w danej temperaturze i ciśnieniu

Stężenie równowagowe można obliczyć np. z równania Totha.

$$x(T, P) = \frac{K_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) \cdot P}{\left[1 + \left(\frac{K_0}{x_\infty} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) \cdot P\right)^t\right]^{\frac{1}{t}}}$$



# Temperatura na wylocie w wymiennika

- Temperaturę cieczy grzewczej na wylocie z wymiennika można obliczyć wykorzystując liczbę jednostek przenikania ciepła NTU. Zakładając, że wymiennik spełnia równanie:

$$Q_{wym} = kA\Delta T$$

- Ciecz grzewcza przepływająca przez wymiennik musi spełniać równanie:

$$Q_g = mc_p (T_{in} - T_{out})$$

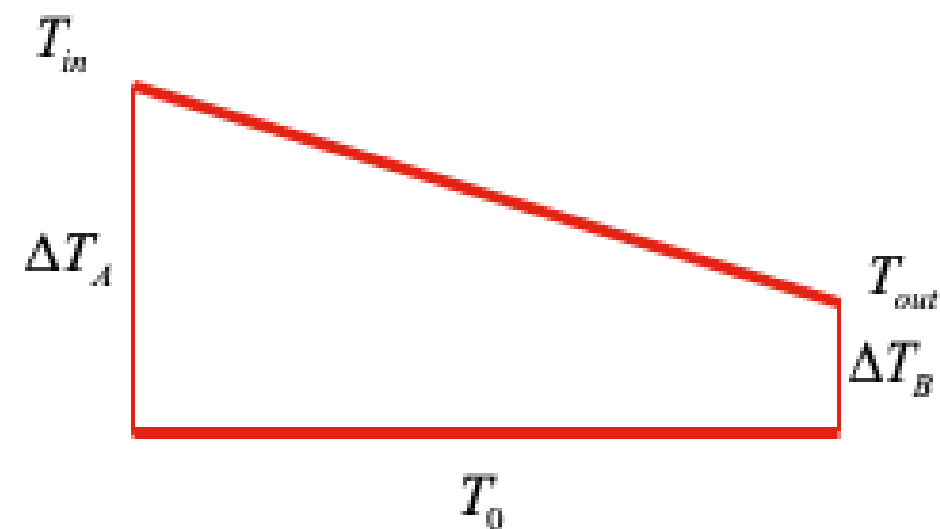
- Oraz:

$$Q_g = Q_{wym}$$

# Temperatura na wylocie z wymiennika

- Logarytmiczna różnica temperatur w wymienniku:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \left( \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \right)}$$



- Co przekształca się do postaci:

$$\Delta T = \frac{(T_{in} - T_0) - (T_{out} - T_0)}{\ln \left( \frac{T_{in} - T_0}{T_{out} - T_0} \right)} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \left( \frac{T_{in} - T_0}{T_{out} - T_0} \right)}$$



# Temperatura na wylocie z wymiennika

- Po zestawieniu wszystkich wzorów:

$$mc_p (T_{in} - T_{out}) = kA \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \left( \frac{T_{in} - T_0}{T_{out} - T} \right)}$$

- Uproszczenie i uporządkowanie stronami prowadzi do:

$$\ln \left( \frac{T_{in} - T_0}{T_{out} - T} \right) = \frac{kA}{mc_p}$$

- Natomiast po pozbyciu się logarytmu, do:

$$\frac{T_{in} - T_0}{T_{out} - T} = \exp \left( \frac{kA}{mc_p} \right)$$



# Temperatura na wylocie z wymiennika

- Uporządkowanie po raz kolejny stronami pozwala na wyciągnięcie temperatury wylotowej cieczy grzewczej z wymiennika  $T_{out}$ :

$$T_{out} - T_0 = (T_{in} - T_0) \exp^{-1} \left( \frac{kA}{mc_p} \right)$$

- Co daje ostateczną, uniwersalną postać równania:

$$T_{out} = T_0 + (T_{in} - T_0) \exp \left( -\frac{kA}{mc_p} \right)$$



# Bilans energii skraplacza

Bilans energii dla skraplacza oblicza się następująco:

$$c_{mcu} M_{m,con} \frac{dT_c}{dt} = \delta_1 \left[ -L \cdot M_a \frac{dx_{des}}{dt} + c_{Lv} M_a \frac{dx_{des}}{dt} (T_c - T_a) - c_{Lc} M_a \frac{dx_{des}}{dt} (T_e - T_c) \right] + m_{w,con} c_{p,water} (T_{cool,in} - T_{cool,out})$$

W skraplaczu nie gromadzi się skroplony czynnik. Wszystko natychmiast splywa do parownika.

Gdzie:

- $M_a$  masa adsorbentu,  $M_{m,con}$  masa skraplacza
- $c_a$  ciepło właściwe adsorbentu,  $c_{Lv}$  adsorbentu parowego,  $c_{Lc}$  adsorbentu ciekłego,  $c_{p,water}$  cieczy grzewczej
- $T_c$  temperatura skraplania
- $T_a$  temperatura zloza,  $T_{cool,in}$  oraz  $T_{cool,out}$  temperatury wlotowa i wylotowa cieczy chlodzacej
- $L$  ciepło przemiany fazowej czynnika
- $m_{w,con}$  strumień masy wody chłodzącej skraplacza

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & \text{,desorpcja} \\ 0 & \text{,adsorpcja} \end{cases}$$



# Bilans energii parowacza

Bilans energii dla parowacza oblicza się następująco:

$$\frac{d}{dt} \left[ (c_{Lc} M_{ew} + c_{m,eva} M_{m,eva}) \cdot T_e \right] =$$
$$(1 - \delta_1) \left[ -L \cdot M_a \frac{dx_{ads}}{dt} + m_{w,eva} c_{p,water} (T_{chill,in} - T_{chill,out}) \right] +$$
$$+ \delta_1 \cdot c_{Lc} M_a \frac{dx_{des}}{dt} (T_e - T_c)$$

Gdzie:

- $M_a$  masa adsorbentu,  $M_{m,eva}$  masa parowacza
- $c_{Lc}$  ciepło właściwe ciekłego czynnika chłodniczego,  $c_{p,water}$  ciepło właściwe cieczy chłodzonej,  $c_{m,eva}$  ciepło właściwe elementów konstrukcyjnych (miedź)
- $T_c$  temperatura skraplania,  $T_e$  temperatura parowania,
- $T_{chill,in}$  oraz  $T_{chill,out}$  temperatury wlotowa i wylotowa wody chłodzonej
- $L$  ciepło przemiany fazowej czynnika
- $m_{w,eva}$  strumień masy wody chłodzonej w parowaczu





# Bilans masy czynnika w parowaczu

- Ilość skroplonego czynnika w parowniku:

$$\frac{dM_{ew}}{dt} = -M_a \left( \frac{dx_{ads}}{dt} + \frac{dx_{des}}{dt} \right)$$



# Wydajność i efektywność

- Wydajność chłodnicza:

$$Q_{ref} = \frac{\int_0^{t_{cycle}} c_{water} m_{w,eva} (T_{chill,in} + T_{chill,out}) dt}{t_{cycle}}$$

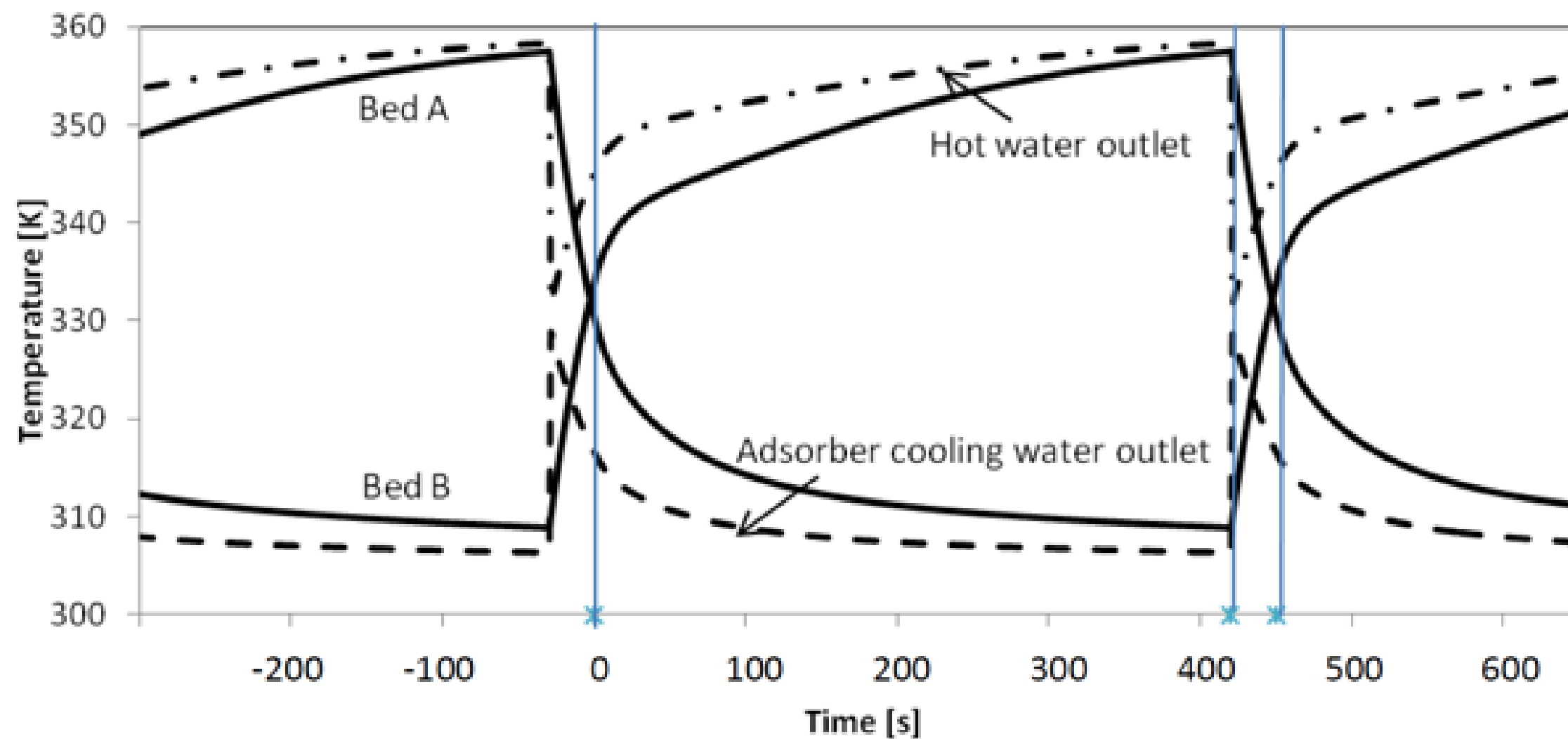
- Nakład energii:

$$Q_h = \frac{\int_0^{t_{cycle}} c_{water} m_{w,h} (T_{h,in} - T_{h,out}) dt}{t_{cycle}}$$

- Współczynnik efektywności COP

$$COP = \frac{Q_{ref}}{Q_h}$$

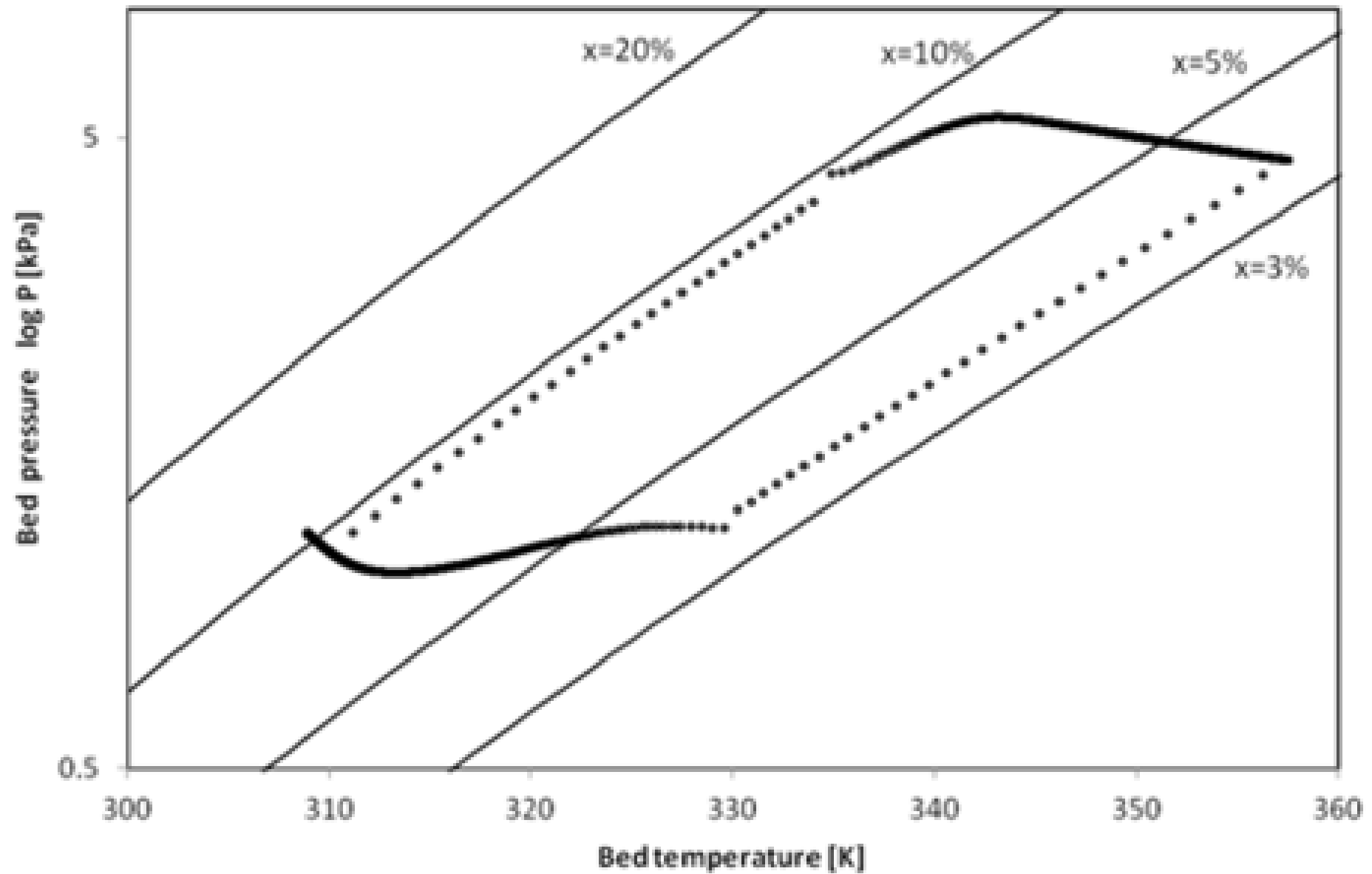
# Wyniki modelowania



Rys. Zmienność temperatury złożeń w czasie.



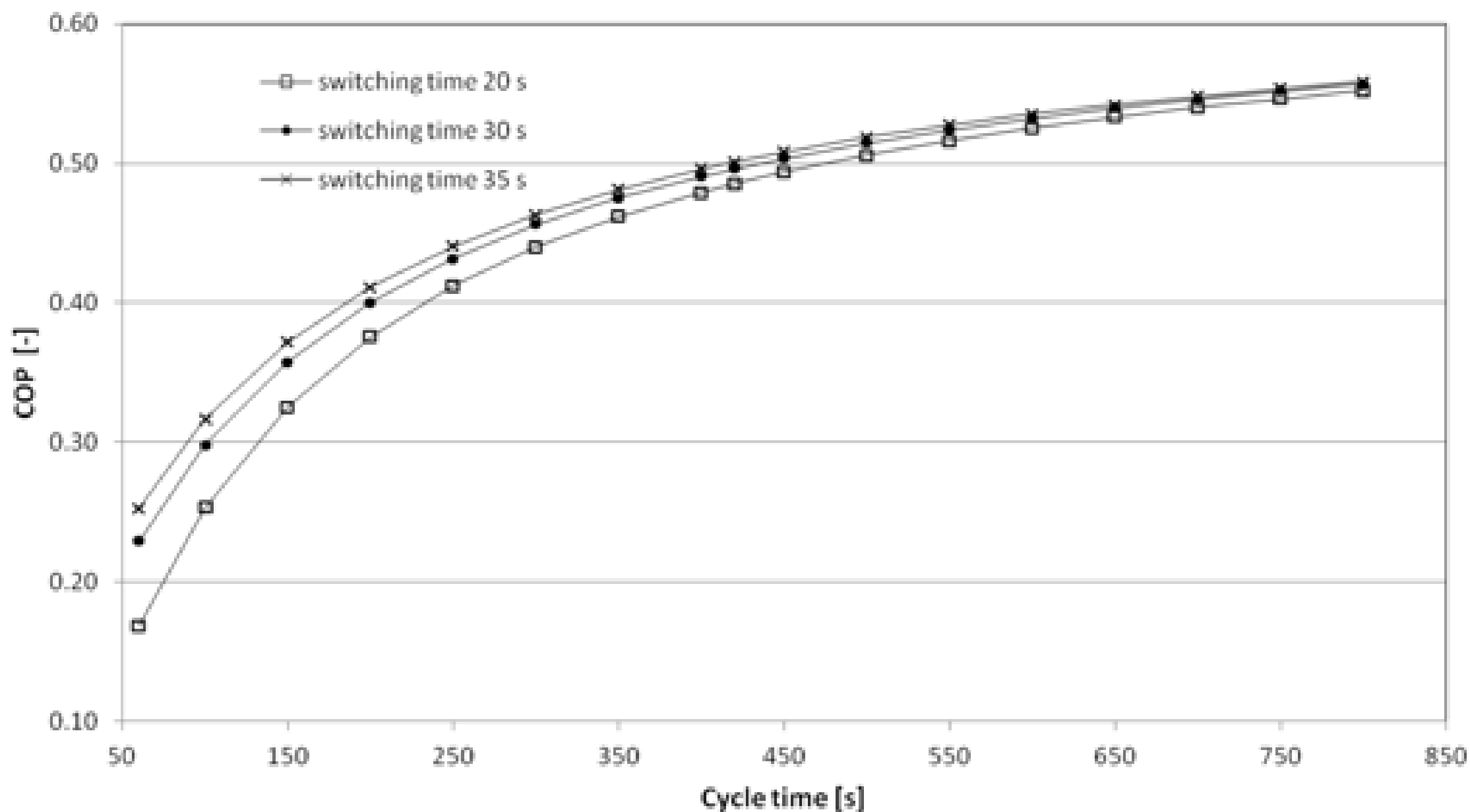
# Wyniki modelowania



Rys. Modelowany układ adsorpcyjny na wykresie p-T.



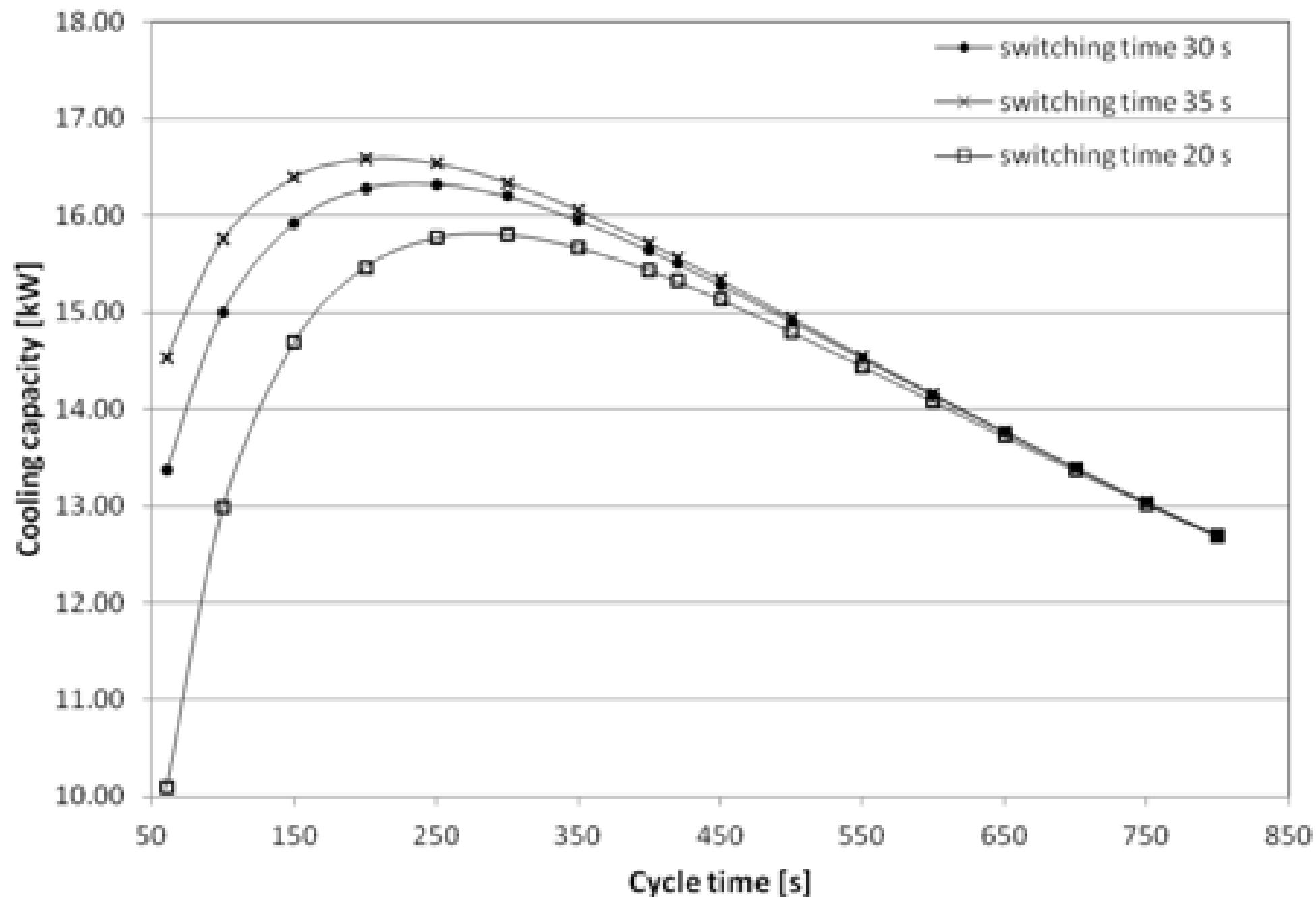
# Wyniki modelowania



Rys. Wpływ długości cyklu pracy oraz długości fazy pośredniej na efektywność COP.



# Wyniki modelowania



Rys. Wpływ długości cyklu pracy oraz długości fazy pośredniej na wydajność chłodniczą.



Politechnika Wrocławska

Dziękuję za uwagę!