



# Komfort wewnętrzny w salach operacyjnych w kontekście wymiarowania urządzeń do uzdatniania powietrza oraz parametrów powietrza zewnętrznego

dr inż. Kazimierz Wojtas

## Zadanie: Klimatyzacja Sali operacyjnej w szpitalu

### ZŁOŻENIA:

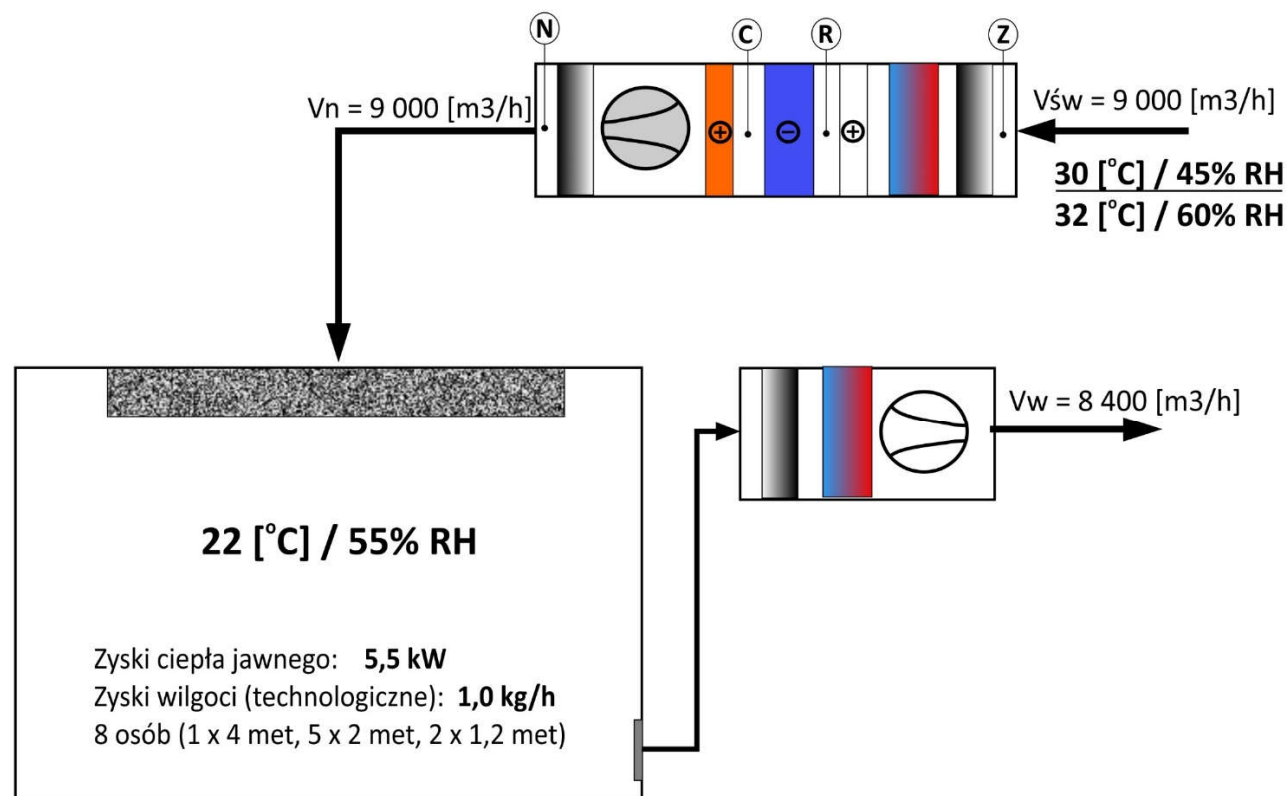
- Parametry powietrza w pomieszczeniu  $t_p = 22 \text{ °C}$ ,  $\varphi = 55\%$ ,  $h_p = 45,0 \text{ kJ/kg}$ ,  $X_p = 9,0 \text{ g/kg}$
- Temperatura powietrza nawiewanego (nawiew laminarny):  $t_N = 20 \text{ °C}$ ,
- Przewidywane zyski ciepła jawnego:  $\Phi_j = 5,5 \text{ kW}$
- Przewidywane zyski wilgoci: (1 osoba [4 met] x 0,35 kg/h + 5 osób [2 met] x 0,15 kg/h + 2 osoby [1,2 met] x 0,075 kg/h = 1,2 kg/h + „zyski operacyjne” = 1,0 kg/h)  $W = 2,26 \text{ kg/h}$
- Przewidywane zyski ciepła całkowitego:  $\Phi_c = \Phi_j + \Phi_u = 5,5 + 1,57 = 7,07 \text{ kW}$
- Wynikowy „współczynnik kierunkowy” przemiany nawiewu powietrza do pomieszczenia:
$$\epsilon_N = \frac{h_p - h_N}{x_p - x_N} = \frac{\Phi_c}{W} = \frac{7,07 \cdot 3600}{2,26} = 11\,262 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$
- Wymagany strumień powietrza nawiewanego (przy powyższych założeniach):
$$V_N = \frac{\Phi_j}{\rho_p \cdot c_p \cdot (t_p - t_N)} = \frac{5,5}{1,2 \cdot 1,0 \cdot (22 - 20)} = 2,30 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = 8250 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$
- Do rozważań przyjęto strumień powietrza nawiewanego:  $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h} = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.1:



- $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{\text{św}} = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Powietrze zewnętrzne (STD):**  
**30°C/45%;  $h_z=61 \text{ kJ/kg}$ ;**  
 **$X_z=11,9 \text{ g/kg}$**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.1

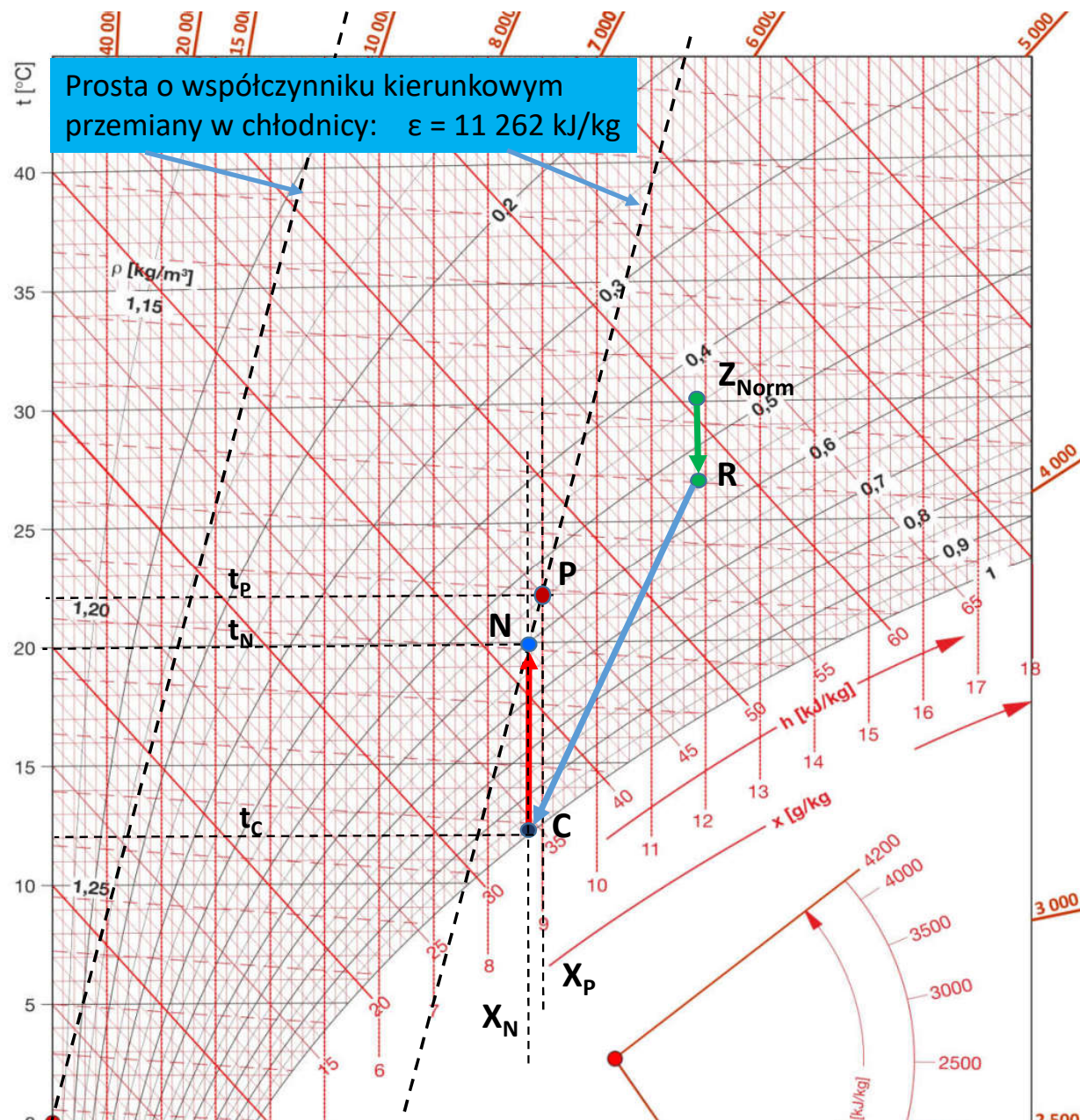
Aby usunąć zakładane zyski wilgoci (2,26 kg/h) przy pomocy  $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$  trzeba osuszyć powietrze nawiewane do zawartości wilgoci:

$$X_N = X_p - \Delta X = 9,0 - 0,21 = 8,79 \text{ g/kg}$$

gdyż:

$$\Delta X = X_p - X_N = \frac{W}{V_N \cdot \rho_p} = \frac{2,26 \cdot 1000}{9000 \cdot 1,2} = 0,21 \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]$$

Temperatura powietrza nawiewanego będzie wynosiła około  $t_N = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.1

### Wynikowe parametry uzdatniania”

1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:
  - temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 26,5 \text{ °C}$
  - entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 57,5 \text{ kJ/kg}$

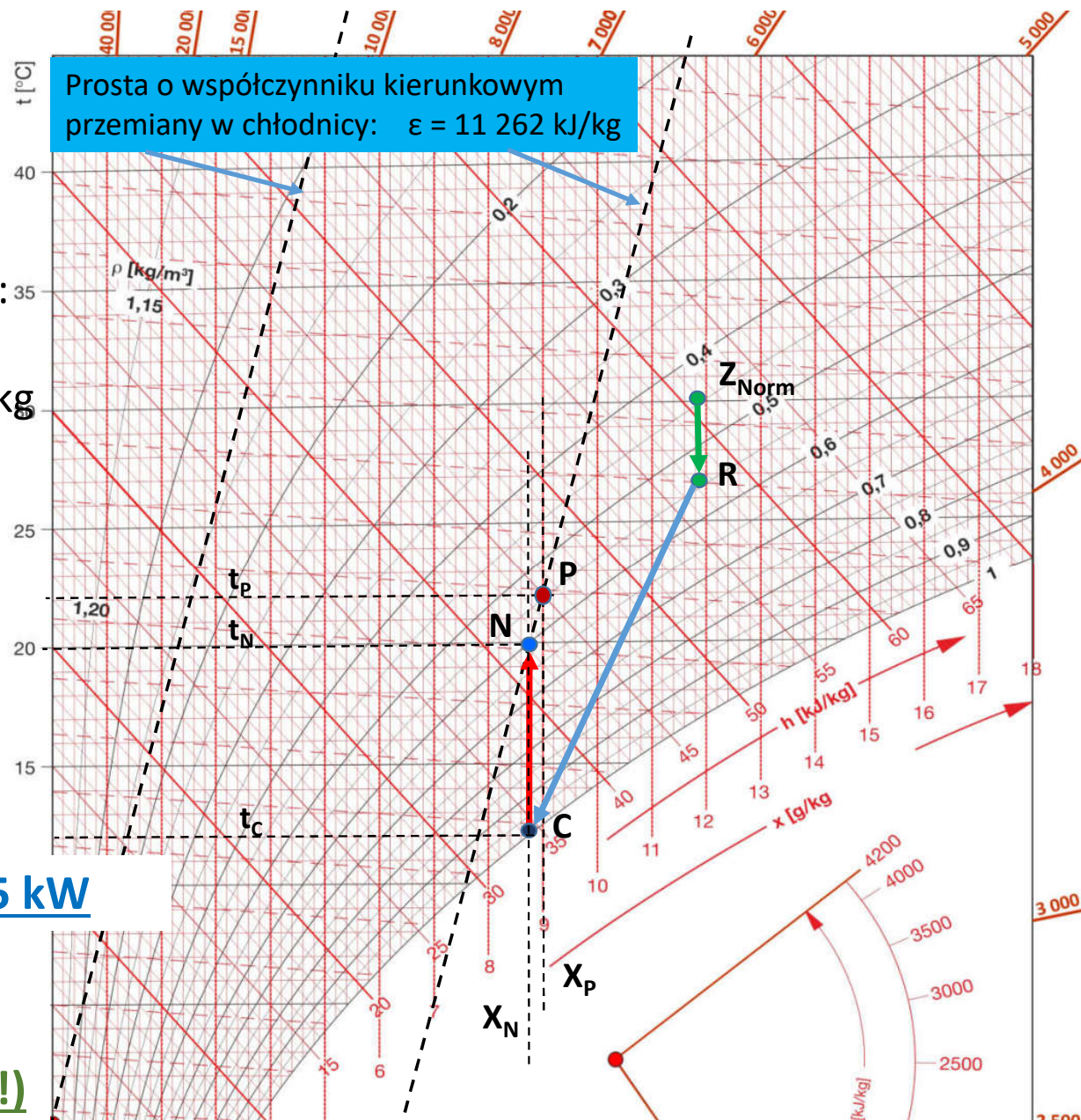
2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:
  - temp. powietrza za chłodnicą  $t_C = 12 \text{ °C}$
  - entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 34,0 \text{ kJ/kg}$
  - temp. ścianki  $t_s = 11 \text{ °C}$
  - $CF = (26,5-10)/(26,5-11) = 0,95$
  - **Woda: 7/12 (możliwe: 8/13)**

3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot (57,5 - 34) = \underline{70,5 \text{ kW}}$$

4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20 - 12) = \underline{24,0 \text{ kW (OZE!!)}}$$

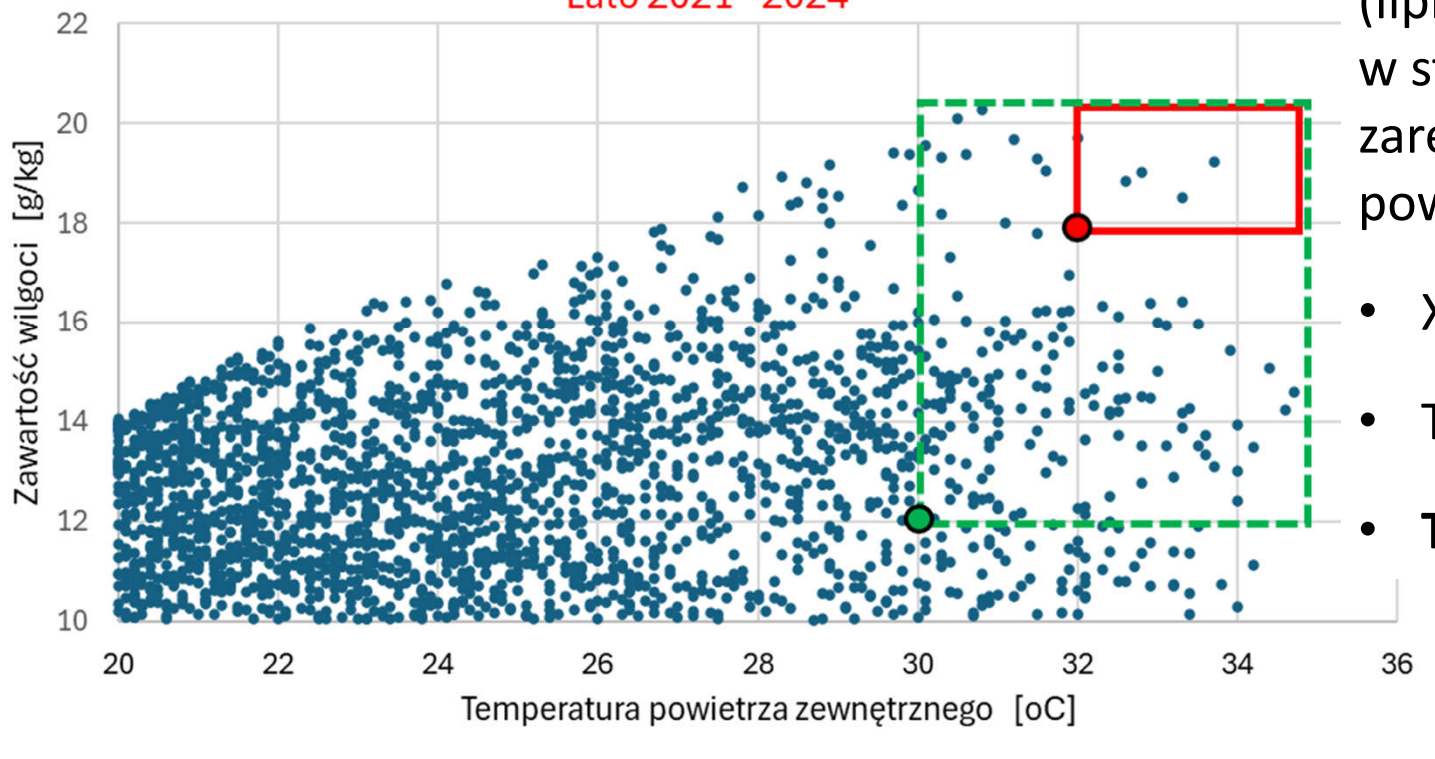


# Zadanie: Klimatyzacja Sali operacyjnej w szpitalu



Temperatury i zawartość wilgoci w powietrzu

Lato 2021 - 2024



W latach 2021-2024  
(lipiec-sierpień)

w stacji Warszawa-Okęcie  
zarejestrowano następujące parametry  
powietrza zewnętrznego:

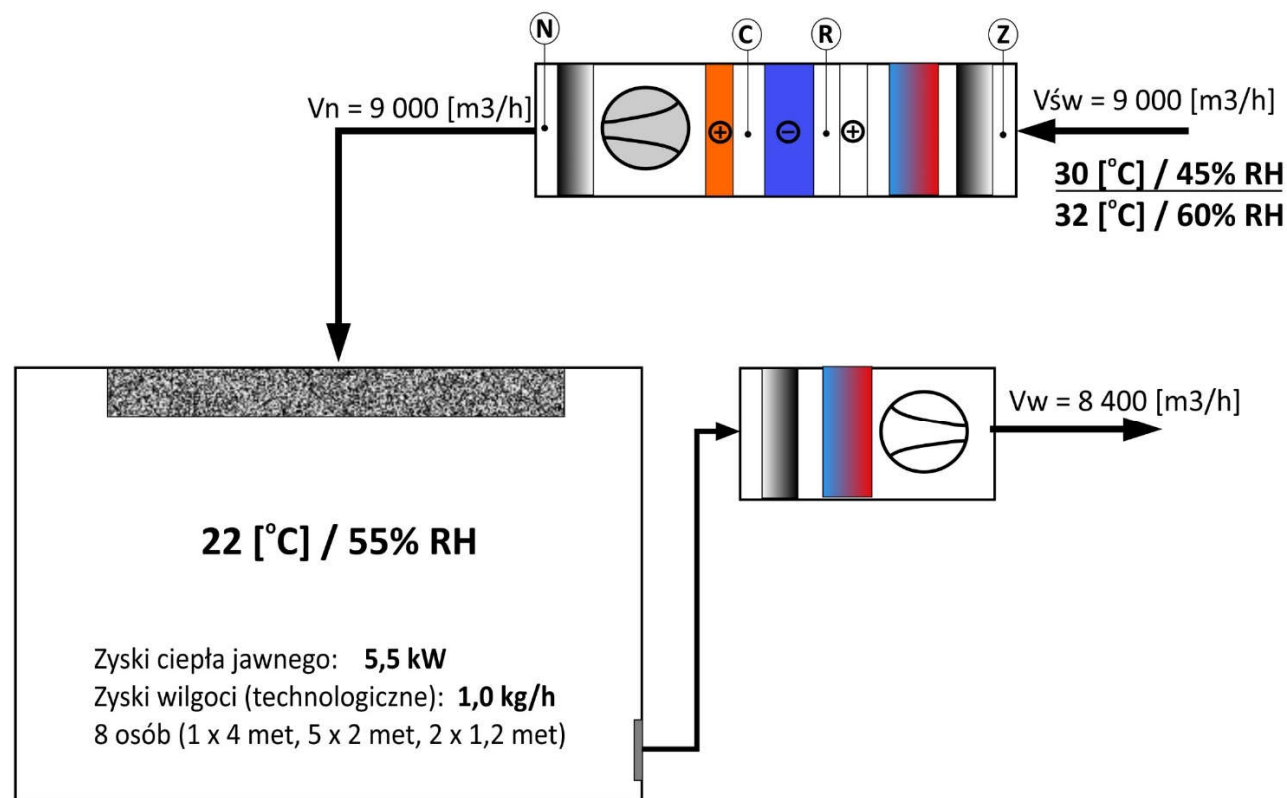
- $X_p \geq 14$  [g/kg] - przez 661 [h]
- $T_p \geq 30$  [°C] - przez 246 [h]
- $T_p \geq 30$  [°C] i  $X_p \geq 14$  [g/kg]-129 [h]

# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.2:



- $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{\dot{S}W} = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Powietrze zewnętrzne (HOT):**  
 **$32^\circ\text{C}/60\%$ ;  $h_z=79 \text{ kJ/kg}$ ;**  
 **$X_z=18,0 \text{ g/kg}$**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.2

### Wynikowe parametry uzdatniania

1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:
  - temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 27,0\text{ °C}$
  - entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 74,0\text{ kJ/kg}$

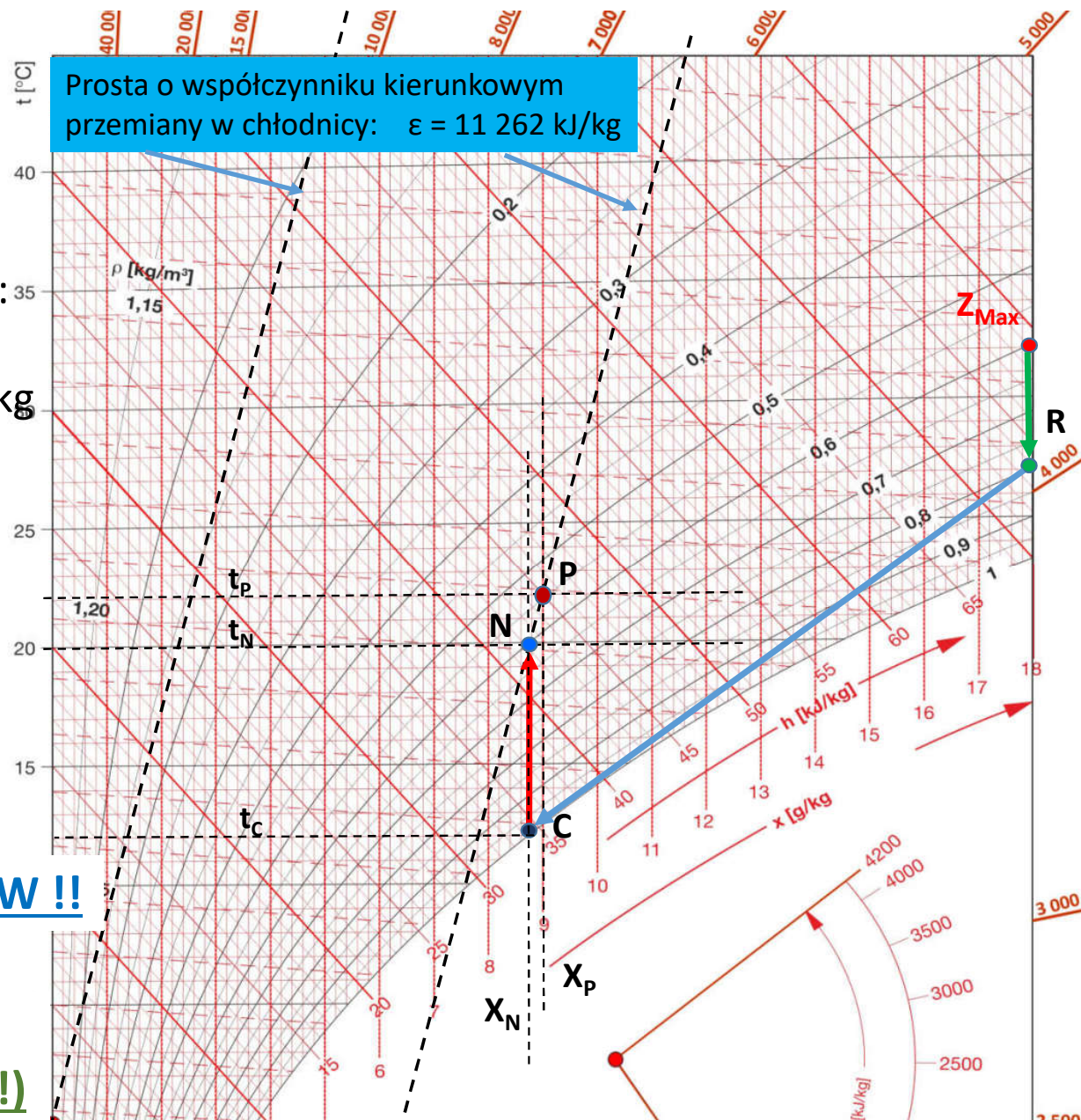
2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:
  - temp. powietrza za chłodnicą  $t_C = 12\text{ °C}$
  - entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 34,0\text{ kJ/kg}$
  - temp. ścianki  $t_S = 11\text{ °C}$
  - $CF = (27-12)/(27-11) = 0,95$
  - **Woda: 7/12 (możliwe 8/13)**

3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot (74 - 34) = \underline{120\text{ kW !!}}$$

4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20 - 12) = \underline{24,0\text{ kW (OZE!!)}}$$

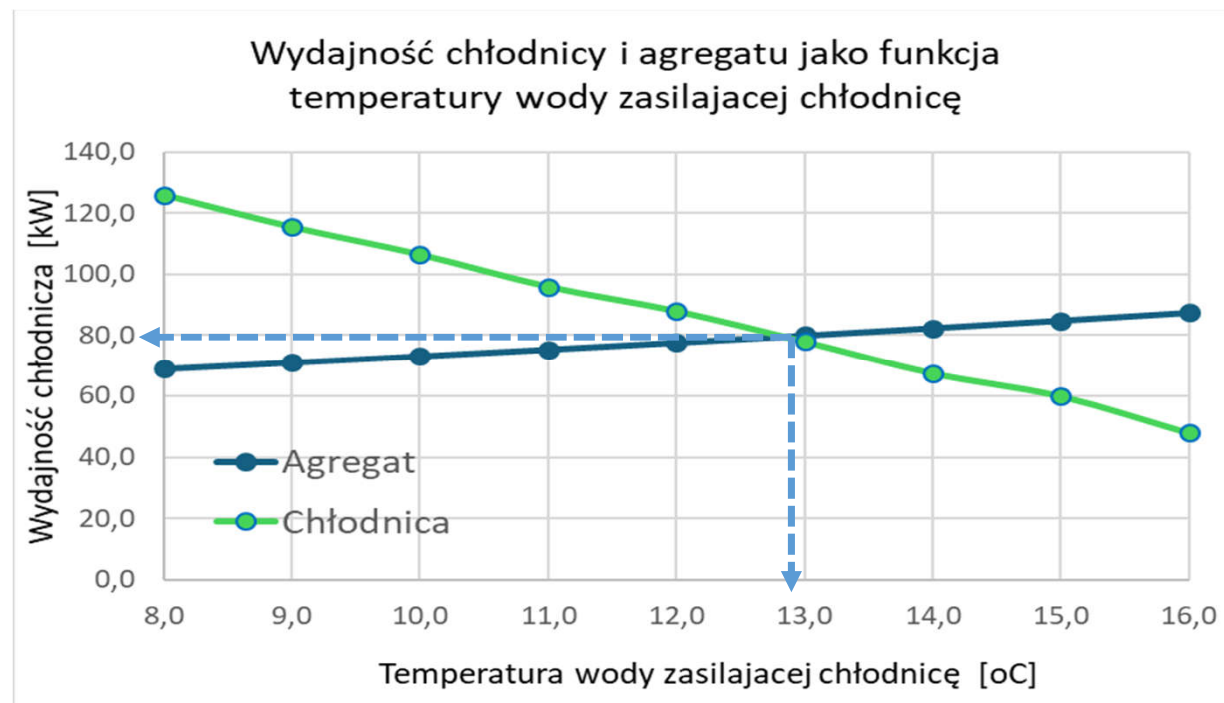




## Klimatyzacja Sali operacyjnej

### Wariant A-1.3

- $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h} = V_{\dot{S}W}$
- **Powietrze zewnętrzne (HOT)**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza



**Agregat i chłodnica zostały  
zwympiarowane na warunki:**

**zewewnętrzne : 30°C/45%;**

- **stały strumień wody zasilającej**
- **stała strumień powietrza (CF=const)**

**Konsekwencje sytuacji jak powyżej:**

1. Wraz z podwyższeniem entalpii powietrza zewnętrznego (wlotowego na chłodnicę):
  - rośnie temperatura wody w agregacie
  - maleje wydajność chłodnicy
  - rośnie wydajność agregatu (ok. 3% na 1K Twody)
2. Stan równowagi cieplnej wystąpi gdy wydajności chłodnicy i agregatu się zrównają

# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant A-1.3

### Wynikowe parametry uzdatniania”

#### 1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:

- temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 27,0 \text{ °C}$
- entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 74,0 \text{ kJ/kg}$

#### 2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:

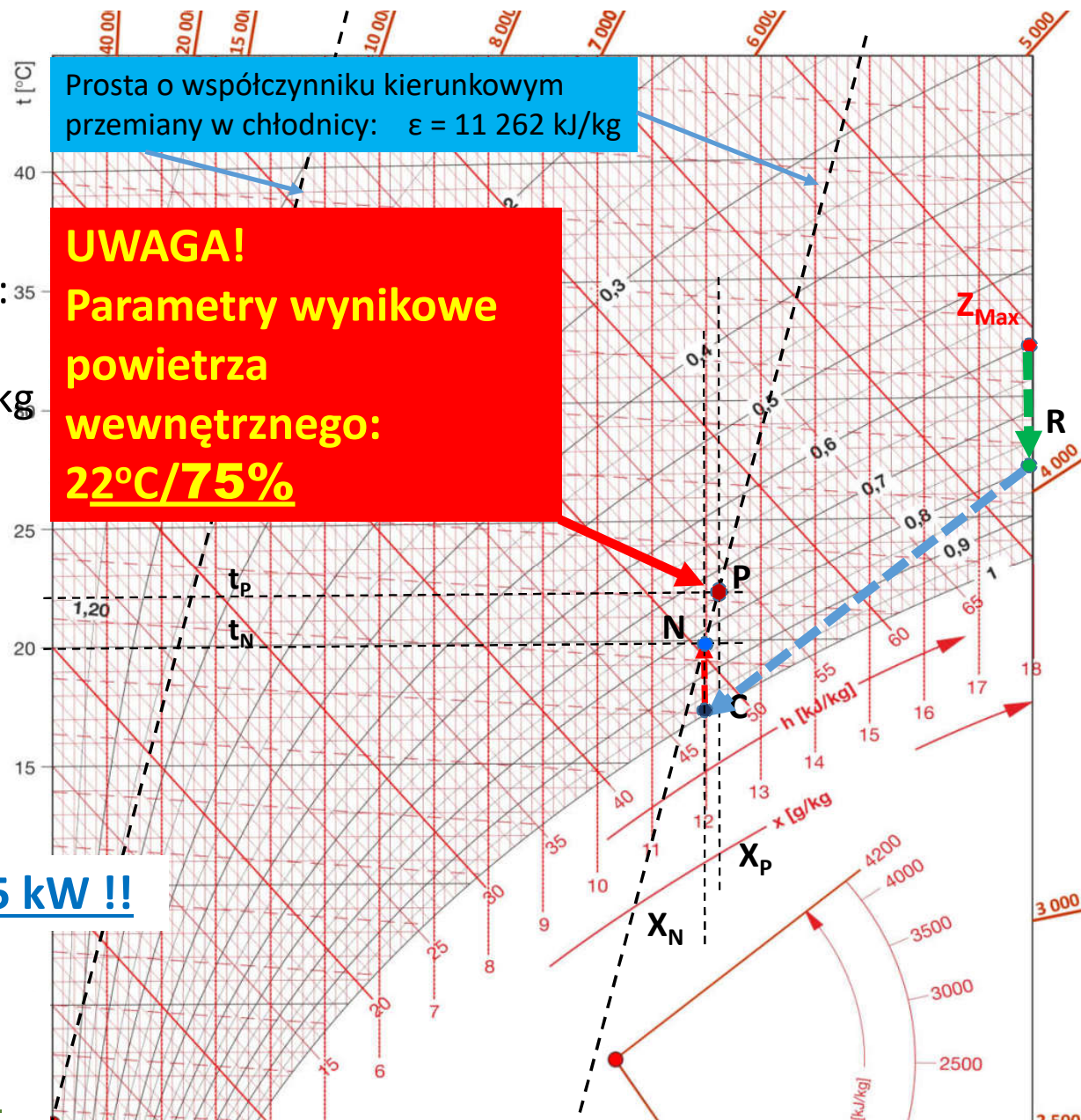
- temp powietrza za chłodnicą  $t_C = 17 \text{ °C}$
- entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 47,5 \text{ kJ/kg}$
- temp ścianki  $t_S = 11 \text{ °C}$
- $CF = (27-17)/(27-16) \approx 0,95$
- **Woda: 13/18 !!**

#### 3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot (74 - 47,5) = \underline{79,5 \text{ kW !!}}$$

#### 4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20 - 17) = \underline{9,0 \text{ kW (OZE!!)}}$$





# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant B-1.1

Aby usunąć zakładane zyski wilgoci (2,26 kg/h) przy pomocy  $V_N = 2400 \text{ m}^3/\text{h}$  trzeba osuszyć powietrze nawiewane do zawartości wilgoci:

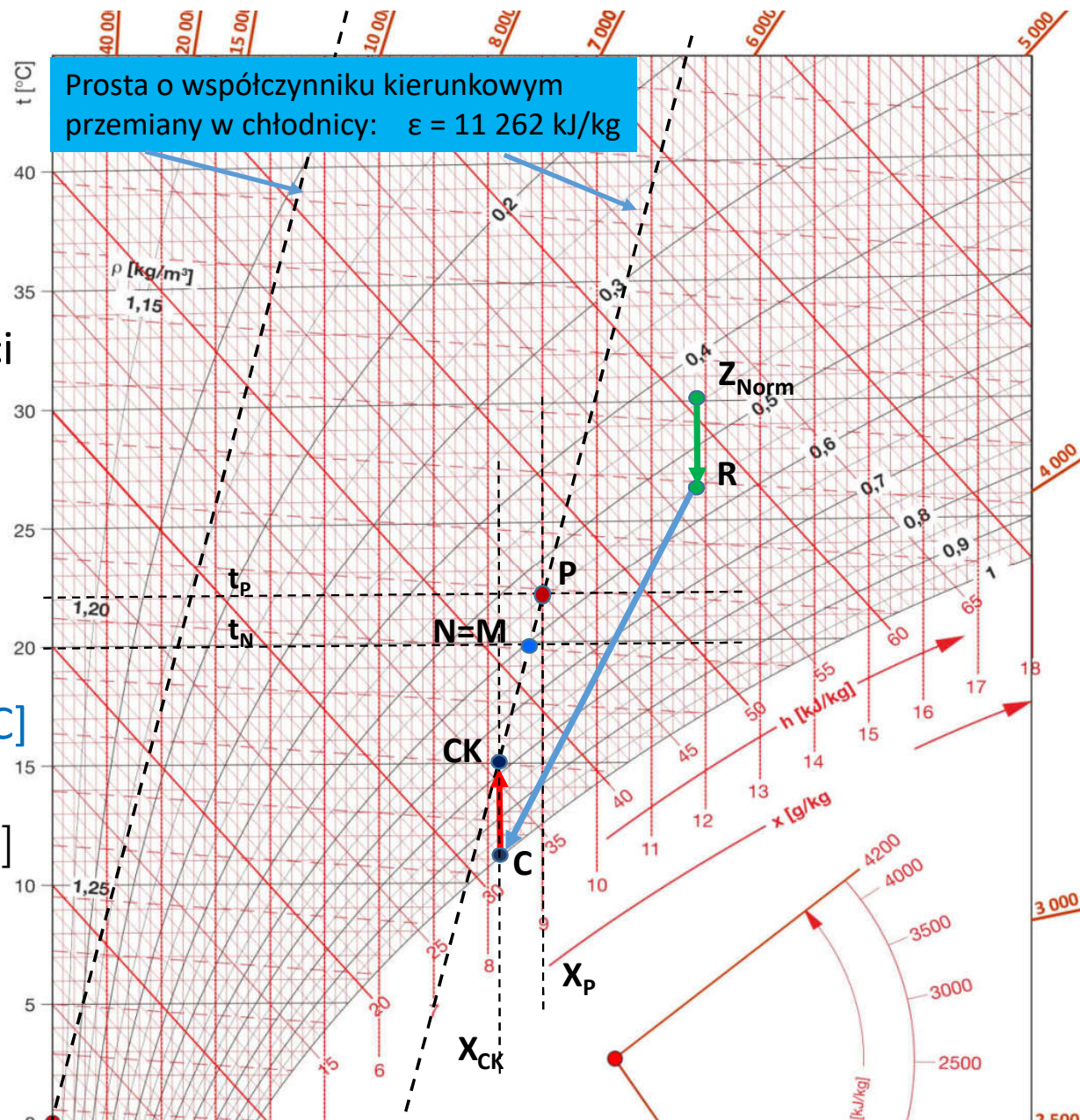
$$X_N = X_p - \Delta X = 9,0 - 0,79 = \mathbf{8,21 \text{ g/kg}}, \text{ gdyż:}$$

$$\Delta X = X_p - X_N = \frac{W}{V_N \cdot \rho_p} = \frac{2,26 \cdot 1000}{2400 \cdot 1,2} = \mathbf{0,79 \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]}$$

Temperatura powietrza uzdatnionego w centrali klimatyzacyjnej:  $CK=22-6,9=\mathbf{15,1 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}$   
gdź:

$$\Delta T_{CK} = T_p - T_U = \frac{\Phi_j}{V_{CK} \cdot \rho_p \cdot c_p} = \frac{5,5 \cdot 3600}{2400 \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \mathbf{6,9 \text{ [K]}}$$

Temperatura powietrza nawiewanego będzie wynosiła:  $T_N = T_M = \mathbf{20 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}$



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant B-1.1

### Wynikowe parametry uzdatniania

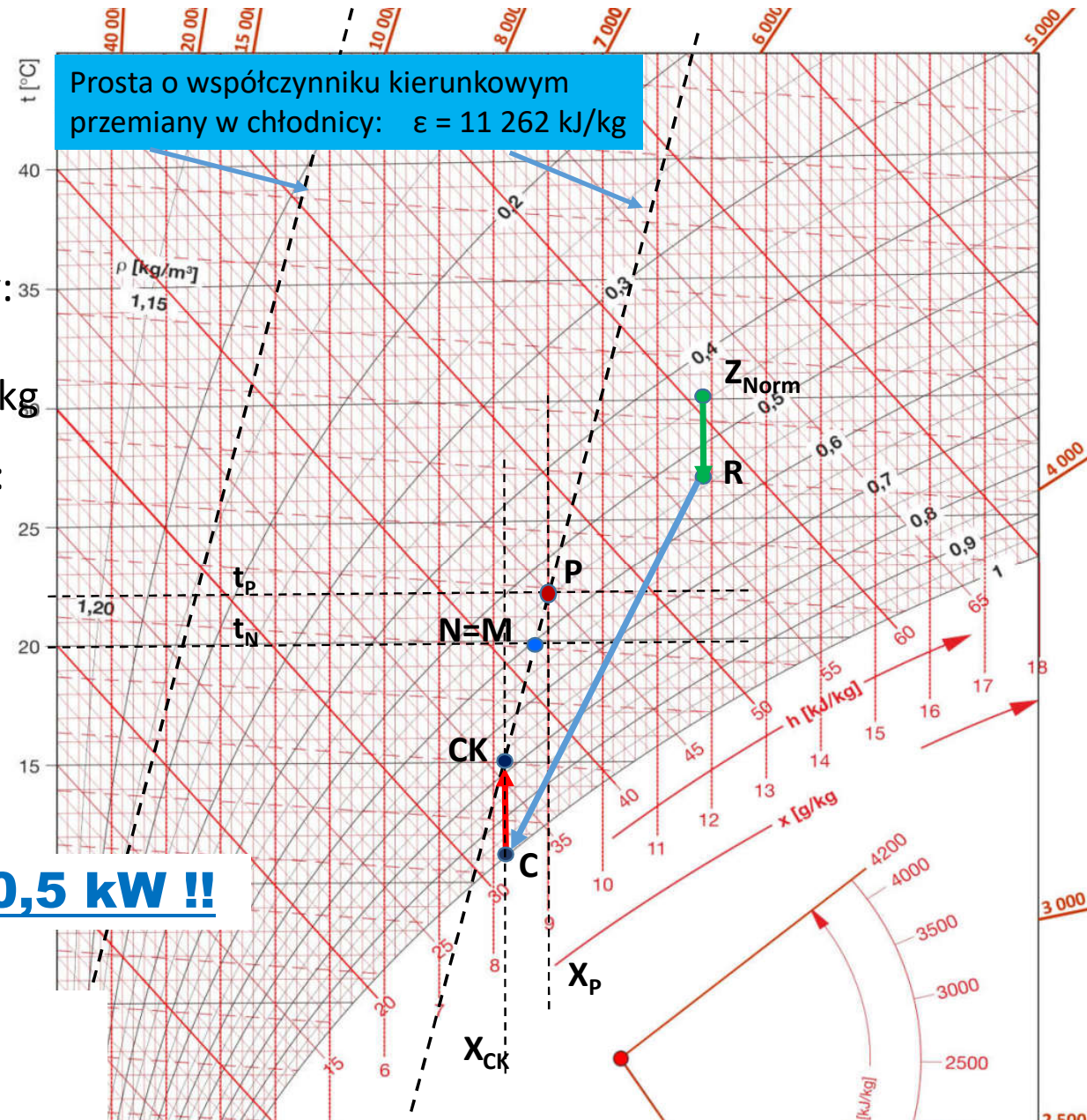
1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:
  - temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 26,5 \text{ °C}$
  - entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 57,5 \text{ kJ/kg}$
2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:
  - temp. powietrza za chłodnicą  $t_C = 11 \text{ °C}$
  - entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 32,0 \text{ kJ/kg}$
  - temp. ścianki  $t_s = 10 \text{ °C}$
  - $CF = (26,5-11)/(26,5-10) \approx 0,95$
  - **Woda: 7/12**

3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 0,67 \cdot 1,2 \cdot (57,5 - 32) = \underline{\underline{20,5 \text{ kW !!}}}$$

4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = 0,67 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20,0 - 15,1) = \underline{\underline{4,0 \text{ kW}}}$$

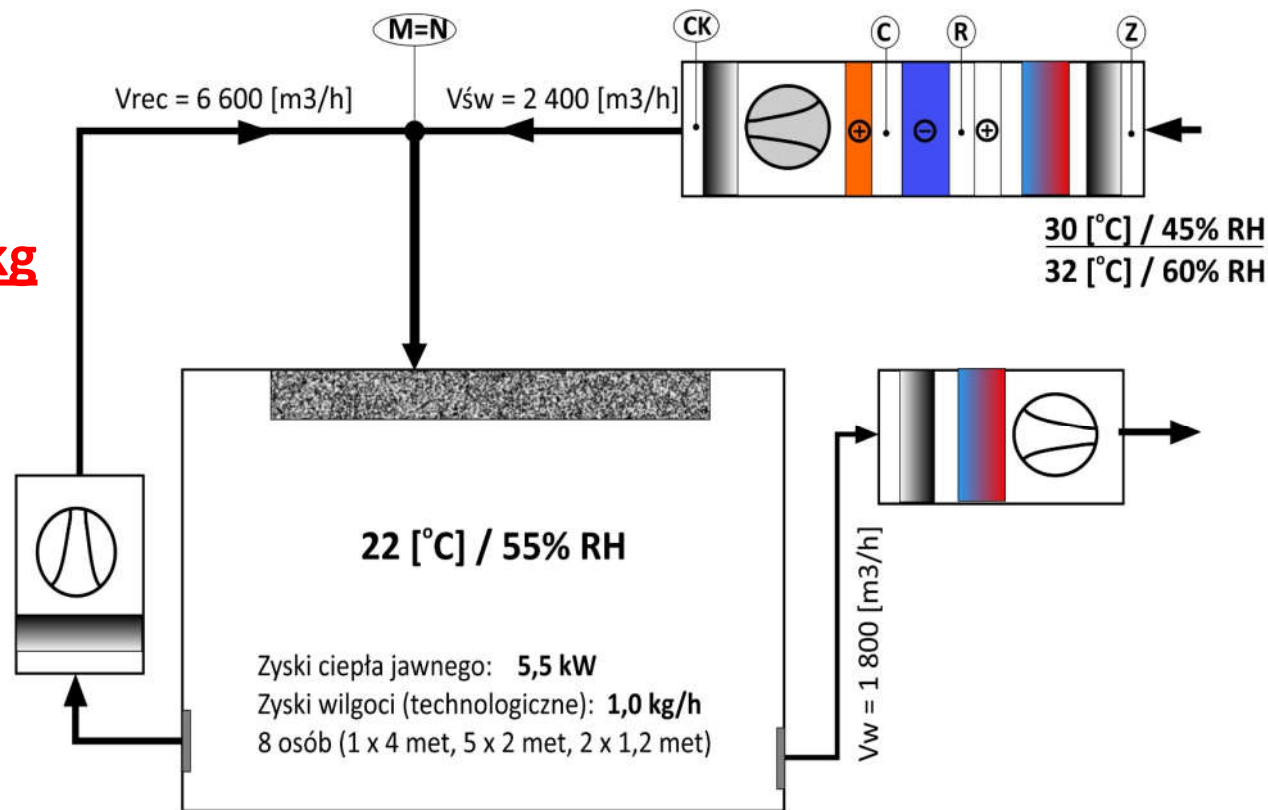


# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant B-1.2:



- $V_{\dot{S}W} = V_U = 2400 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{REC} = 6600 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_M = V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Powietrze zewnętrzne (HOT):**  
**32°C/60%;  $h_z=79 \text{ kJ/kg}$ ;  $X_z=18,0 \text{ g/kg}$**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Urządzenie recyrkulujące bez funkcji chłodzenia
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza
- Mieszanie powietrza na wylocie z centrali klimatyzacyjnej



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant B-1.2

### Wynikowe parametry uzdatniania”

#### 1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:

- temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 27,0 \text{ °C}$
- entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 74,0 \text{ kJ/kg}$

#### 2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:

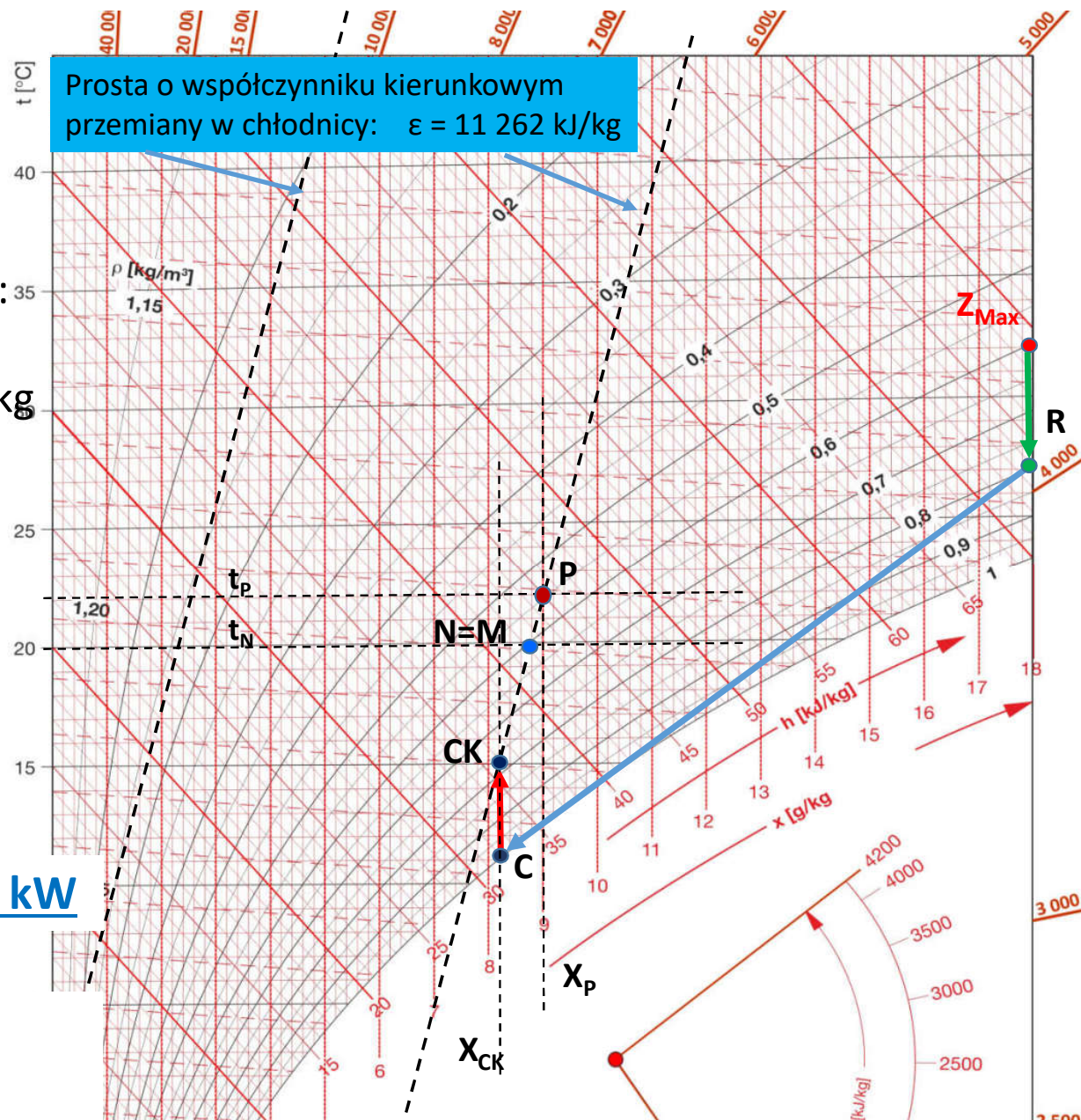
- temp powietrza za chłodnicą  $t_C = 11 \text{ °C}$
- entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 32,0 \text{ kJ/kg}$
- temp ścianki  $t_s = 10 \text{ °C}$
- $CF = (26,5-11)/(26,5-10) = 0,95$
- **Woda: 7/12**

#### 3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 0,67 \cdot 1,2 \cdot (74 - 32) = \underline{33,6 \text{ kW}}$$

#### 4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = 0,67 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20,0 - 15,1) = \underline{4,0 \text{ kW}}$$

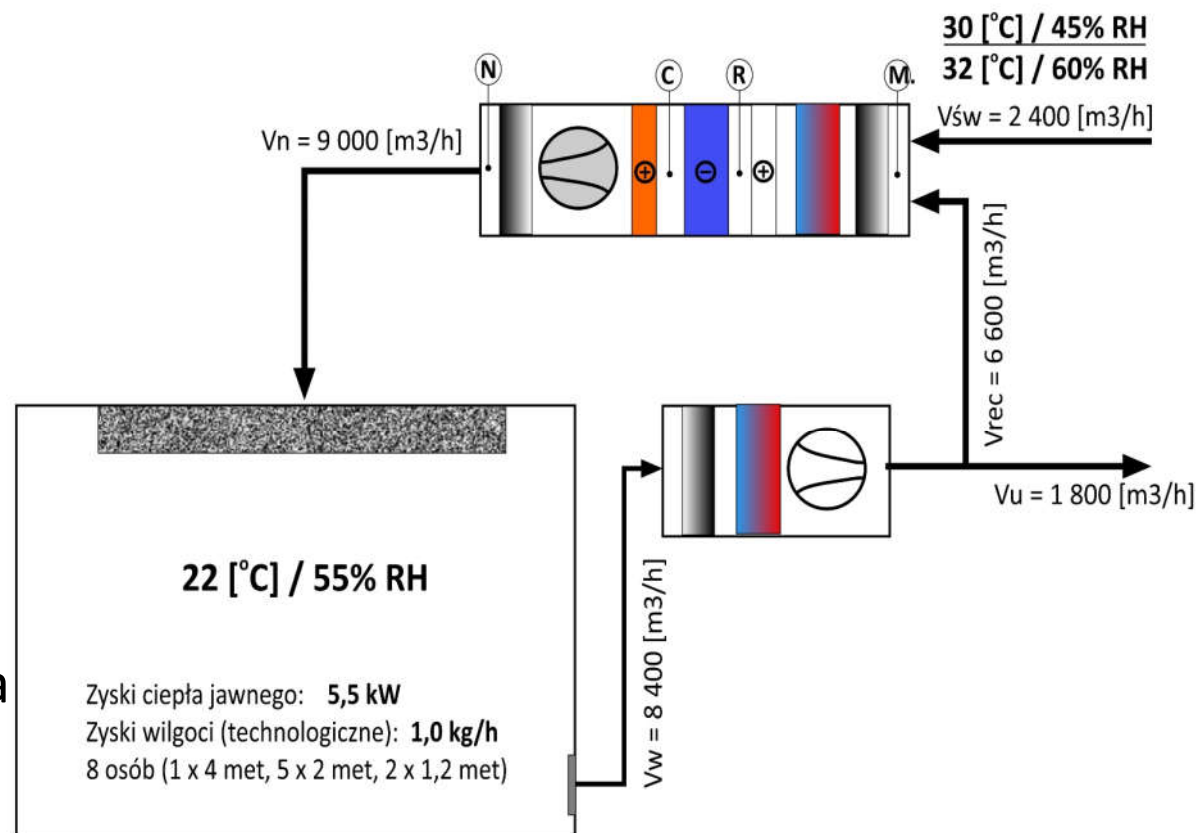


# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant C-1.1:



- $V_{\text{ŚW}} = 2400 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{\text{REC}} = 6600 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{\text{M}} = V_{\text{UZ}} = V_{\text{N}} = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Powietrze zewnętrzne (STD):**  
**30°C/45%;  $h_z=61 \text{ kJ/kg}$ ;  $X_z=11,9 \text{ g/kg}$**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Urządzenie recyrkulujące bez funkcji chłodzenia
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza
- Mieszanie na wlocie do centrali klimatyzacyjnej





# Klimatyzacja Sali operacyjnej

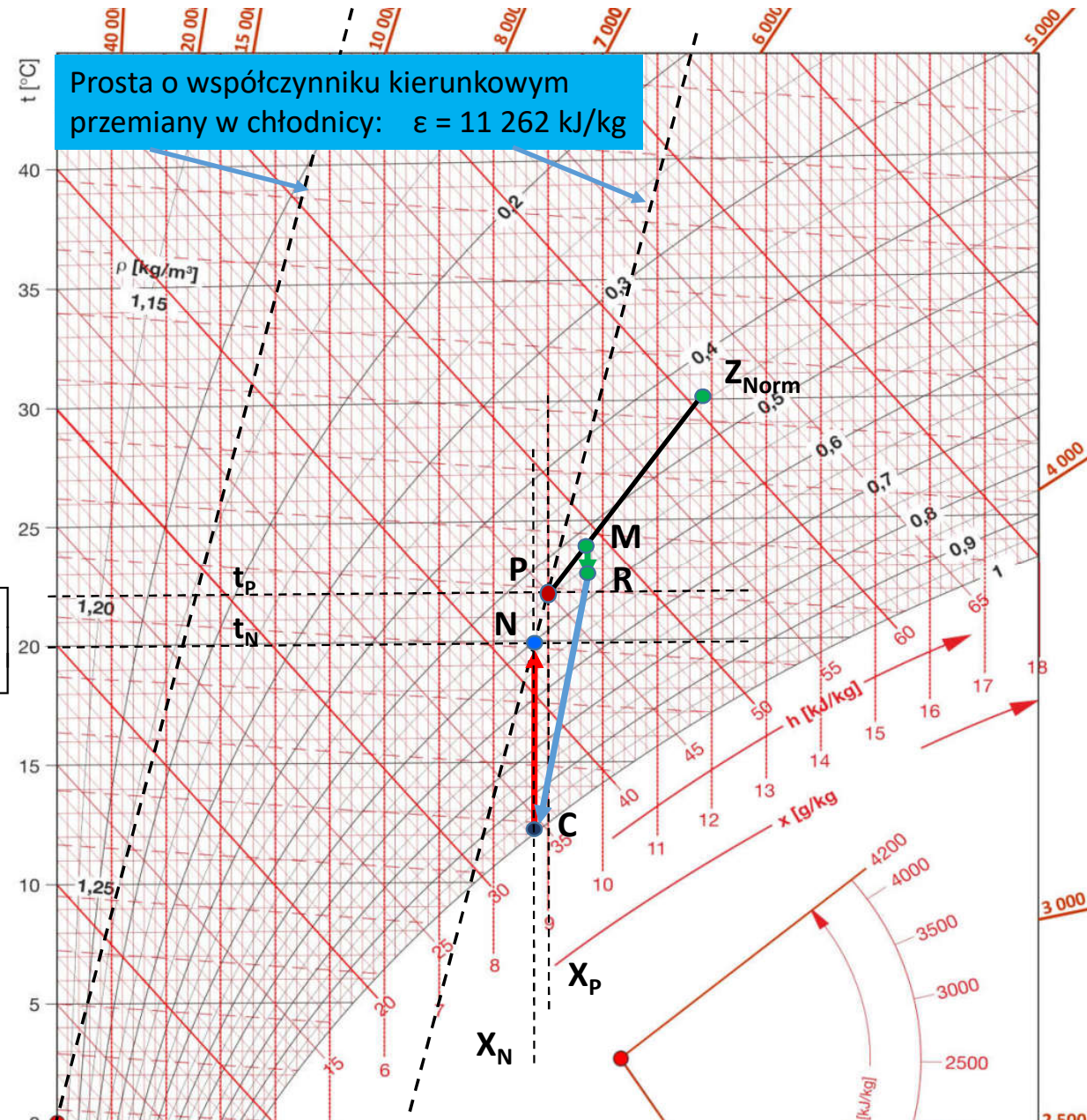
## Wariant C-1.1

Aby usunąć zakładane zyski wilgoci (2,26 kg/h) przy pomocy  $V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$  trzeba osuszyć powietrze nawiewane do zawartości wilgoci:

$$X_N = X_p - \Delta X = 9,0 - 0,21 = 8,79 \text{ g/kg}$$

$$\text{gdyż: } \Delta X = X_p - X_N = \frac{W}{V_N \cdot \rho_p} = \frac{2,26 \cdot 1000}{9000 \cdot 1,2} = 0,21 \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]$$

Temperatura powietrza nawiewanego będzie wynosiła  $t_N = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant C-1.1

### Wynikowe parametry uzdatniania

#### 1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:

- temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$
- entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 48,0 \text{ kJ/kg}$

#### 2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:

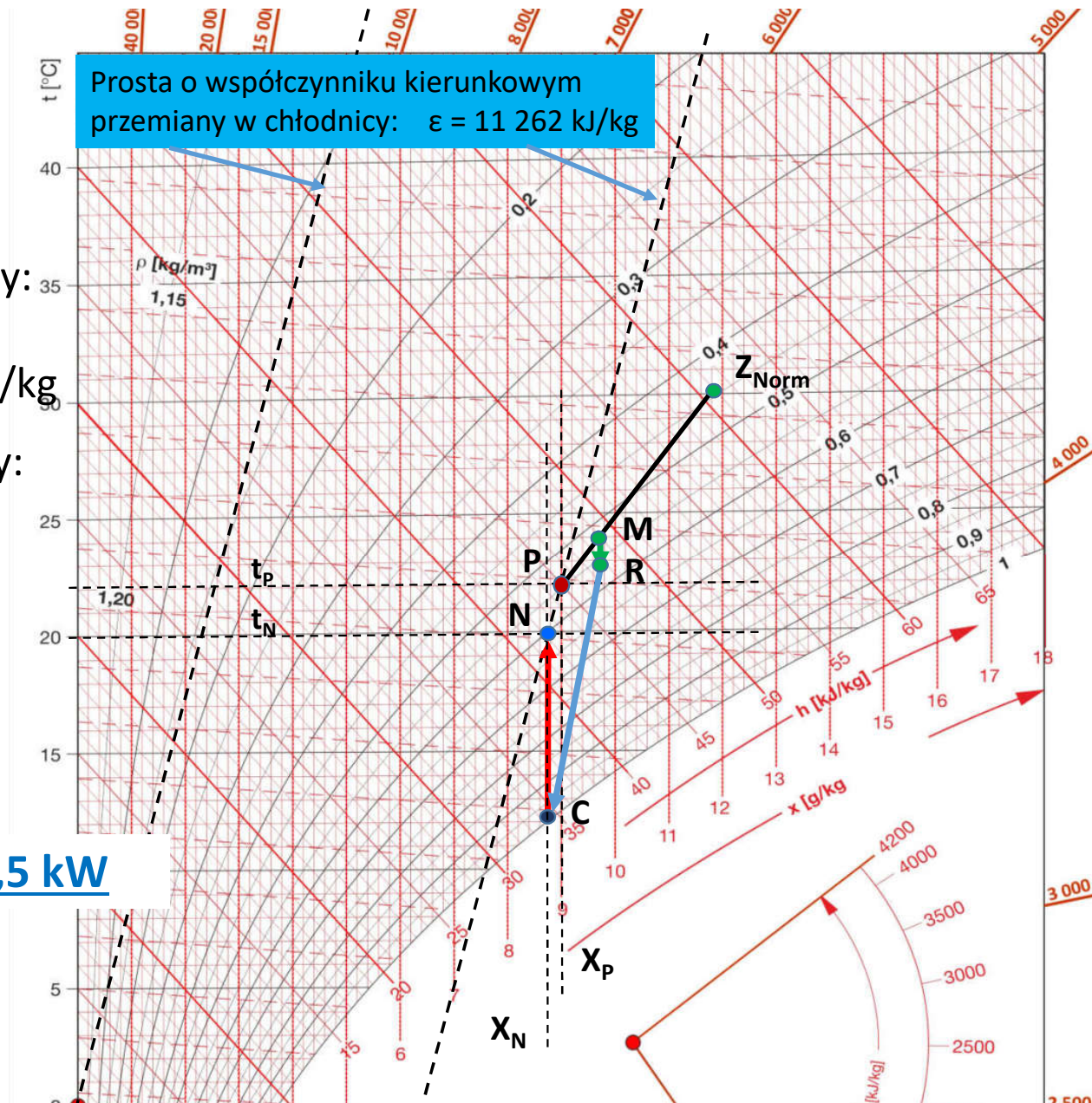
- temp. powietrza za chłodnicą  $t_C = 12 \text{ }^\circ\text{C}$
- entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 34,0 \text{ kJ/kg}$
- temp. ścianki  $t_S = 11 \text{ }^\circ\text{C}$
- $CF = (23-12)/(23-11) = 0,92$
- **Woda: 7/12 (możliwe: 8/13)**

#### 3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot (47,5 - 34) = \underline{40,5 \text{ kW}}$$

#### 4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = \\ 0,67 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20,0 - 12,0) = 6,4 \text{ kW}$$

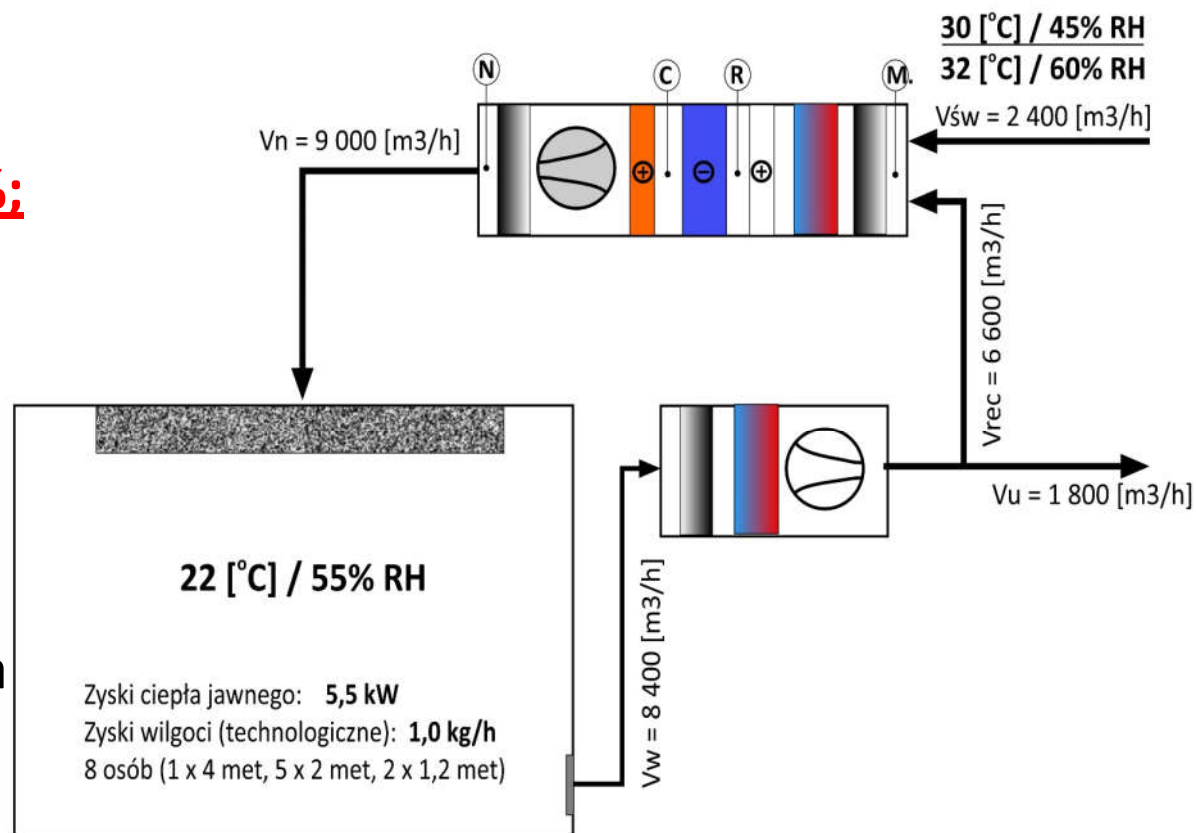


# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant C-1.2:



- $V_{\dot{S}W} = 2400 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_{REC} = 6600 \text{ m}^3/\text{h}$
- $V_M = V_{UZ} = V_N = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Powietrze zewnętrzne (HOT):  $32^\circ\text{C}/60\%$ ;**  
 **$h_z=79 \text{ kJ/kg}$ ;  $X_z=18,0 \text{ g/kg}$**
- Rekuperator glikolowy:  $\eta = 45\%$
- Urządzenie recyrkulujące bez funkcji chłodzenia
- Centrala klimatyzacyjna w całości przejmuje funkcję chłodzenia i osuszania powietrza
- Mieszanie na wlocie do centrali klimatyzacyjnej



# Klimatyzacja Sali operacyjnej

## Wariant C-1.2

### Wynikowe parametry uzdatniania

#### 1. Parametry powietrza na wlocie do chłodnicy:

- temp. pow. przed chłodnicą  $t_R = 23,5 \text{ °C}$
- entalpia pow. przed chłodnicą  $h_R = 52,5 \text{ kJ/kg}$

#### 2. Parametry powietrza na wylocie z chłodnicy:

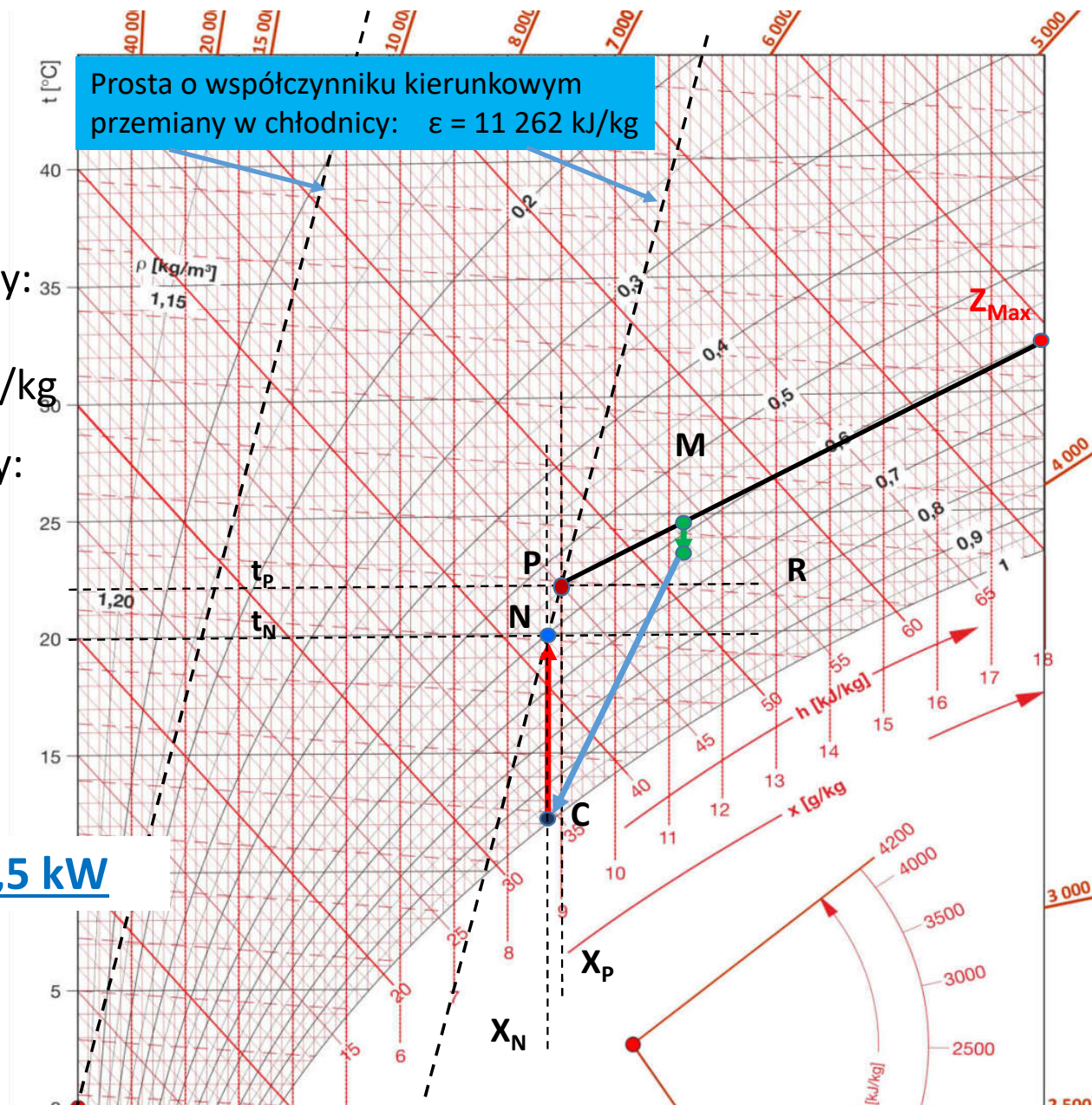
- temp. powietrza za chłodnicą  $t_C = 12 \text{ °C}$
- entalpia pow. za chłodnicą  $h_C = 34,0 \text{ kJ/kg}$
- temp. ścianki  $t_S = 11 \text{ °C}$
- $CF = (23,5-12)/(23,5-11) = 0,92$
- **Woda: 7/12 (możliwe: 8/13)**

#### 3. Wynikowa wydajność chłodnicza:

$$\Phi_{CK} = V \cdot \rho_p \cdot (h_R - h_C) = 2,5 \cdot 1,2 \cdot (52,5 - 34) = \underline{55,5 \text{ kW}}$$

#### 4. Wynikowa wydajność nagrzewnicy:

$$\Phi_{NCK} = V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot (t_C - t_{CK}) = \\ 0,67 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (20,0 - 12,0) = 6,4 \text{ kW}$$





# Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach

## Podsumowanie analizy wariantowej

Dla przyjętych założeń Zysków ciepła i wilgoci oraz oczekiwanych parametrów powietrza zewnętrznego dokonano analizy wariantów uzdatniania powietrza i wymiarowania urządzeń dla 2-ch wersji parametrów obliczeniowych powietrza zewnętrznego: STD (wg PN) oraz warunków ekstremalnych (HOT).

- **wariant A** – bez recyrkulacji powietrza, z glikolowym odzyskiem chłodu
- **wariant B** – z recyrkulacją powietrza przy pomocy „recyklerów” (bez chłodnicy) z mieszaniem powietrza na wylocie z centrali klimatyzacyjnej (przed nawiewnikiem laminarnym), z glikolowym odzyskiem chłodu
- **wariant C** – z recyrkulacją i mieszaniem powietrza na wlocie do centrali klimatyzacyjnej, z glikolowym odzyskiem chłodu

# Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach

## **Podsumowanie analizy wariantowej (cd)**

### **WNIOSKI:**

1. Każdy z powyższych wariantów posiada możliwości uzyskania założonych parametrów powietrza w pomieszczeniu sali operacyjnej (zarówno pod względem temperatury jak i wilgotności), ale pod następującymi warunkami:
  - poprawnego wymiarowania urządzeń
  - wdrożenia poprawnej strategii sterowania (kontrola temperatury i wilgotności w pomieszczeniu)
  - wyraźnego ograniczenia parametrów powietrza zewnętrznego w których warunki będą dotrzymane
2. Oparcie wymiarowania urządzeń na założeniach warunków zewnętrznych wg PN (STD) w konsekwencji może skutkować tym, że w niektórych godzinach lata parametry powietrza w pomieszczeniu sali operacyjnej osiągną:
  - temperatura: **22 °C (zgodna z wymaganiami)**
  - wilgotność względna: **ok. 75% (znacznie powyżej dopuszczalnej)**



# Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach

## Podsumowanie analizy wariantowej (cd)

3. Poszczególne warianty różnią się znacznie, szczególnie w zakresie „obliczeniowego zapotrzebowania wydajności chłodniczej agregatu:

Wariant	A-1.1.	A-1.2.	B-1.1.	B-1.2.	C-1.1.	C-1.2.
Wydajność chłodnicza [kW]	70,5	120,0	20,5	33,6	40,5	55,5
Wydajność grzewcza [kW]	24,0	24,0	4,0	4,0	6,4	6,4

4. Należy zwrócić uwagę, że w dzisiejszych uwarunkowaniach, **obowiązkowo** nagrzewnica wtórna w układzie do suszenia powietrza musi być zasilana ciepłem odpadowym (odzysk ciepła ze skraplacza agregatu ziębniczego), lub innym OZE

## Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach



### **Potencjalne przyczyny braku parametrów komfortu w pomieszczeniu**

1. Niewłaściwie przyjęte założenia (w zakresie zysków ciepła i wilgoci)
  2. parametry powietrza zewnętrznego wykraczają poza przyjęte w obliczeniach wymiarujących urządzenia
  3. niewłaściwe zwymiarowanie chłodnicy
  4. chłodnica służąca osuszaniu powietrza powinna charakteryzować się:
    - dużą ilością rzędów,
    - niską prędkością przepływającego powietrza
    - dużymi odstępami lamel ( $> 2,5$  mm)
1. niewłaściwa konfiguracja uzdatniania (brak nagrzewnicy wtórnej)
  2. niewłaściwa strategia sterowania
  3. brak pełnego zrozumienia procesów uzdatniania powietrza zarówno przez projektanta jak i automatyka ☹️