

# PROCES RAZVLAŽIVANJA ZRAKA

---

**Vučić, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:388806>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCES RAZVLAŽIVANJA ZRAKA**

Rijeka, rujan 2022.

Marko Vučić

0035211544

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PROCES RAZVLAŽIVANJA ZRAKA**

Mentor: Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Rijeka, rujan 2022.

Marko Vučić

0035211544

Rijeka, 9. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Termodinamika I**  
Grana: **2.11.02 procesno energetsko strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Marko Vučić (0035211544)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **PROCES RAZVLAŽIVANJA ZRAKA/ AIR DEHUMIDIFICATION PROCESS**

### Opis zadatka:

Potrebno je opisati osnovni termodinamički proces razvlaživanja zraka hlađenjem na temperaturu nižu od temperature rošenja i naknadnim grijanjem zraka. Opisati postupak proračuna karakterističnih termodinamičkih veličina procesa razvlaživanja zraka. Za različite parametre pogona izvršiti termodinamičku analizu procesa te usporediti procese. Rad mora obuhvatiti: uvod s opisom osnovnih procesa s vlažnim zrakom, opis procesa razvlaživanja, termodinamički proračun karakterističnih fizikalnih veličina pri procesu razvlaživanja, prikaz i analizu dobivenih rezultata, zaključak, popis oznaka, popis korištene literature te sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



---

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



---

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći literaturu i znanja stečena tijekom studija uz vodstvo mentora Prof. dr.sc. Kristiana Lenića.

Rijeka, rujan 2022.

Marko Vučić

Handwritten signature of Marko Vučić in blue ink.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Kristianu Leniću na potpori, strpljenju, uloženom vremenu, te raznim savjetima koji su bili od velike pomoći pri izradi ovoga rad.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. VLAŽNI ZRAK .....	2
2.1. Fizikalne veličine za opis stanja vlažnog zraka.....	2
2.2. Molliero <sup>v</sup> hx – dijagram.....	4
3. PROCESI PROMJENE STANJA VLAŽNOG ZRAKA .....	5
3.1. Grijanje vlažnog zraka.....	5
3.2. Hlađenje vlažnog zraka .....	6
3.3. Hlađenje i grijanje vlažnog zraka.....	6
3.4. Miješanje zračnih struja.....	8
3.5. Dodavanje vode ili vodene pare .....	9
4. UTJECAJ TEMPERATURE $t_2$ NA PROCES RAZVLAŽIVANJA VLAŽNOG ZRAKA .....	12
4.1. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=10^\circ\text{C}$ .....	12
4.2. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=15^\circ\text{C}$ .....	16
4.3. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=20^\circ\text{C}$ .....	19
4.4. Utjecaj promijene temperature $t_2$ na proces razvlaživanja .....	23
5. UTJECAJ POČETNE RELATIVNE VLAŽNOSTI ZRAKA $\varphi_1$ NA PROCES RAZVLAŽIVANJA VLAŽNOG ZRAKA .....	27
5.1. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=50\%$ .....	27
5.2. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=70\%$ .....	30
5.3. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=90\%$ .....	34
5.4. Utjecaj promjene relativne vlažnosti $\varphi_1$ na proces razvlaživanja .....	37
6. ZAKLJUČAK .....	42
7. LITERATURA .....	43
8. POPIS OZNAKA .....	44
9. POPIS SLIKA .....	45
10. POPIS TABLICA.....	46
11. SAŽETAK.....	47
12. SUMMARY .....	48

## 1. UVOD

Zrak u zemljinoj atmosferi je smjesa raznih plinova sa određenim udjelom vodene pare. Razni udjeli vodene pare u zraku atmosfere su bitni za odvijanje mnogih procesa na Zemlji. Razina vlažnosti zraka čak ima utjecaj na ljude te se mogu osjetiti različite vrijednosti vlažnosti zraka. Primjerice kod relativno niske vlažnosti zraka naša tijela ubrzano gube tekućinu koju je potrebno redovno nadomjestiti, dok pri višim razinama vlažnosti visoke temperature zraka ćemo više osjetiti.

U ovom radu će se se govoriti o osnovnom procesu razvlaživanja zraka koji se redovno koristi u raznim postupcima u proizvodnji te u uređajima koje svakodnevno koristimo. Cilj rada je pokazati koliki je utrošak energije pri različitim parametrima, tu u konačnici zaključiti kada je utrošak energije najmanji jer tada su i troškovi procesa najmanji.



## 2. VLAŽNI ZRAK

Vlažni zrak je kombinacija suštog zraka i vodene pare. Potrebno je razlikovati sušti i suhi zrak jer pojmovi imaju različitu definiciju. Sušti zrak je samo komponenta vlažnog zraka. Dok je suhi zrak vlažni zrak kojem se pomoću kondenzacije uklonila vodena para, tj. zrak sa malom relativnom vlažnosti. Vlažni zrak se smatra kao smjesa idealnih plinova kada je parcijalni tlak vodene pare manji od tlaka zasićenja za zadanu temperaturu, tada je vodena para u plinovitom agregatnom stanju te ne dolazi do kondenzacije.

### 2.1. Fizikalne veličine za opis stanja vlažnog zraka

Fizikalne veličine kojima često opisujemo stanje vlažnog zraka su: temperatura, apsolutna i relativna vlažnost zraka, stupanj zasićenja i specifična entalpija.

Apsolutna vlažnost zraka  $x$  je omjer količine vodene pare koja se nalazi u vlažnom zraku i količine suštog zraka.

$$x = \frac{W}{Z} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \quad (2.1)$$

$W$  – masa vodene pare u vlažnom zraku [kg]

$Z$  – masa suštog zraka [kg]

Apsolutna vlažnost zraka za suhi zrak iznosi:

$$x = 0 \quad (2.2)$$

Dok apsolutna vlažnosti za čistu vodenu paru iznosi:

$$x = \infty \quad (2.3)$$

Relativna vlažnost zraka  $\varphi$  je omjer parcijalnog tlaka vodene pare i tlaka zasićenja za zadanu temperaturu.

$$\varphi = \frac{p_d}{p_g} \quad (2.4)$$

$p_d$  – parcijalni tlak vodene pare [Pa]

$p_g$  – tlak zasićenja za zadanu temperaturu [Pa]

Relativna vlažnost za suhi zrak iznosi:

$$\varphi = 0 \quad (2.5)$$

Dok relativna vlažnost za zrak potpuno zasićen vodenom parom iznosi:

$$\varphi = 1 \quad (2.6)$$

Stupanj zasićenja  $\chi$  je omjer apsolutne vlažnosti zraka i apsolutne vlažnosti zasićenog zraka.

$$\chi = \frac{x}{x_g} \quad (2.7)$$

$x_g$  – apsolutna vlažnost zasićenog zraka [kg/kg]

Za iste vrijednosti stanja zraka, stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti:

$$\chi \approx \varphi \quad (2.8)$$

Specifična entalpija  $h$  vlažnog zraka je zbroj iznosa specifične entalpije suštog zraka i specifične entalpije vodene pare.

$$h = h_z + x \cdot h_d \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (2.9)$$

$h_z$  – specifična entalpija suštog zraka [kJ/kg]

$h_d$  – specifična entalpija vodene pare [kJ/kg]

Proširivanjem izraza za specifičnu entalpiju (2.9) dobiva se:

$$h = c_{pz} \cdot t + x \cdot (c_{pd} \cdot t + r_0) \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (2.10)$$

$c_{pz}$  – specifični toplinski kapacitet suštog zraka, koji iznosi:  $c_{pz} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$

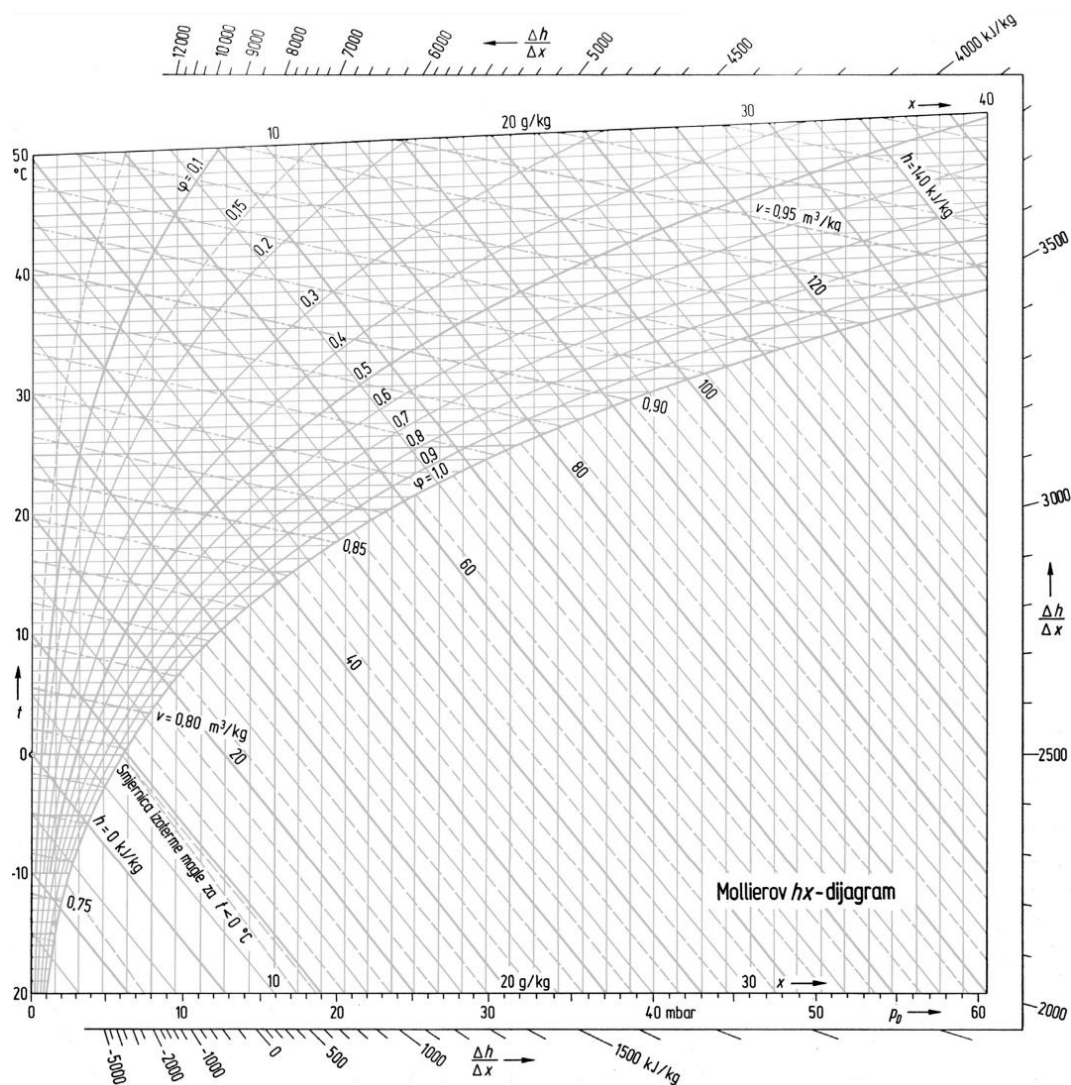
$c_{pd}$  – specifični toplinski kapacitet vodene pare, koji iznosi:  $c_{pd} = 1,93 \text{ kJ/kgK}$

$r_0$  – specifična toplota potrebna za isparavanje vode, koja iznosi:  $r_0 = 2500 \text{ kJ/kg}$

## 2.2. Molliero $hx$ – dijagram

Molliero  $hx$  – dijagram prikazan na slici 2.1. će se koristiti za prikaz stanja vlažnog zraka pri različitim temperaturama i apsolutnim vlažnostima. Znači na osi apscisa je izražena apsolutna vlažnost zraka u gramima po kilogramu a na ordinati je izražena temperatura u Celzijevim stupnjevima.

Dijagram je podijeljen na dva područja, nezasićeno i zasićeno. Dva područja dijeli krivulja naziva linija rošenja ili krivulja zasićenja. Relativna vlažnost stanja na krivulji zasićenja je 100%, tj.  $\varphi = 1$ . Nezasićeno područje vlažnog zraka se nalazi iznad krivulje zasićenosti, dok se zasićeno područje nalazi ispod krivulje.



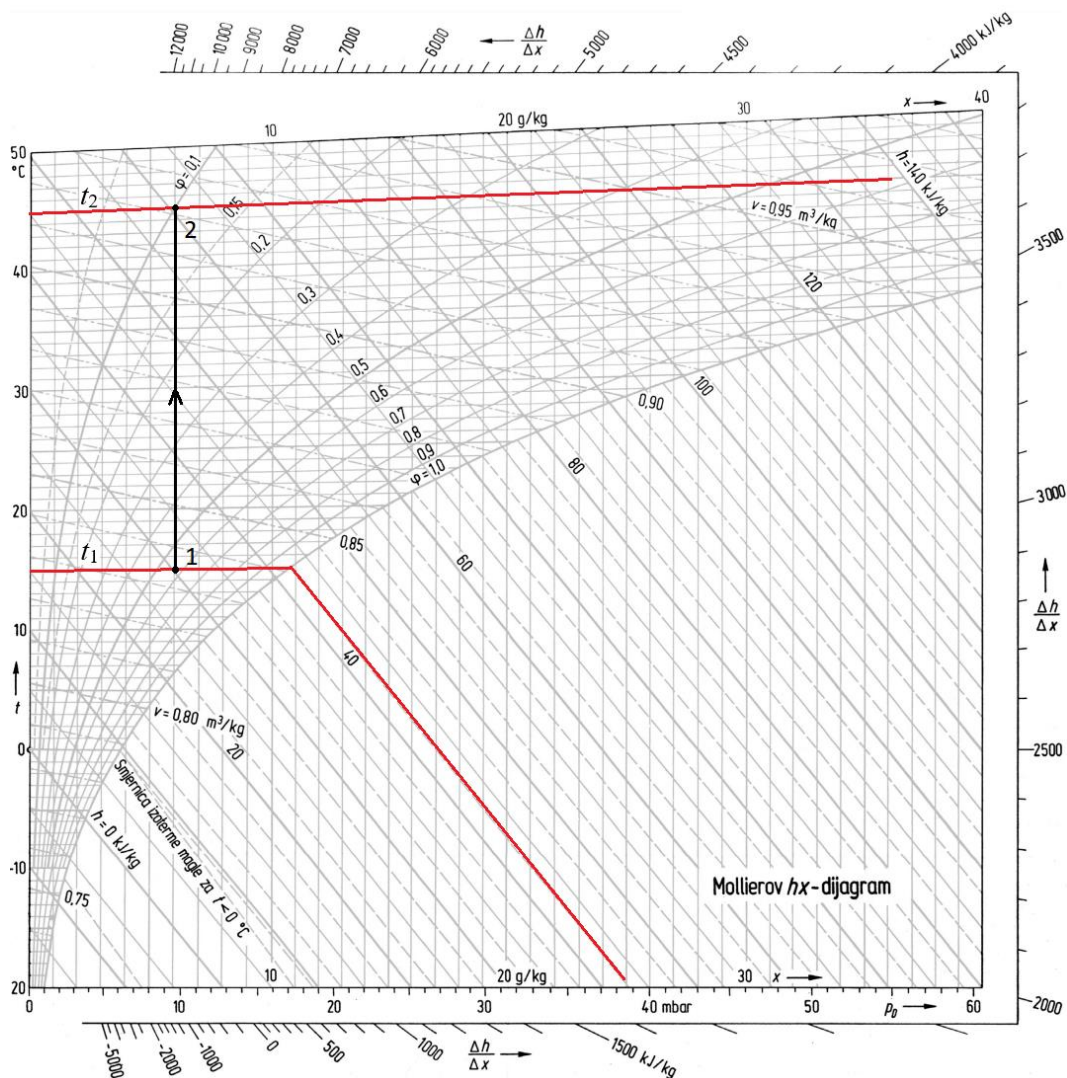
Slika 2.1 Molliero  $hx$  – dijagram

### 3. PROCESI PROMJENE STANJA VLAŽNOG ZRAKA

#### 3.1. Grijanje vlažnog zraka

Grijanje vlažnog zraka je promjena stanja, prikazana na slici 3.1, kod koje se zrak grije sa temperature  $t_1$  i relativne vlažnosti  $\varphi_1$  na temperaturu  $t_2$ . U procesu se vlažnom zraku povećavaju temperatura zajedno sa specifičnom entalpijom, dok se smanjuje relativna vlažnost, a apsolutna vlažnost ostaje ista. Dovedena toplotina računa se pomoću:

$$Q_{12} = Z \cdot (h_2 - h_1) [\text{k}] \quad (3.1)$$

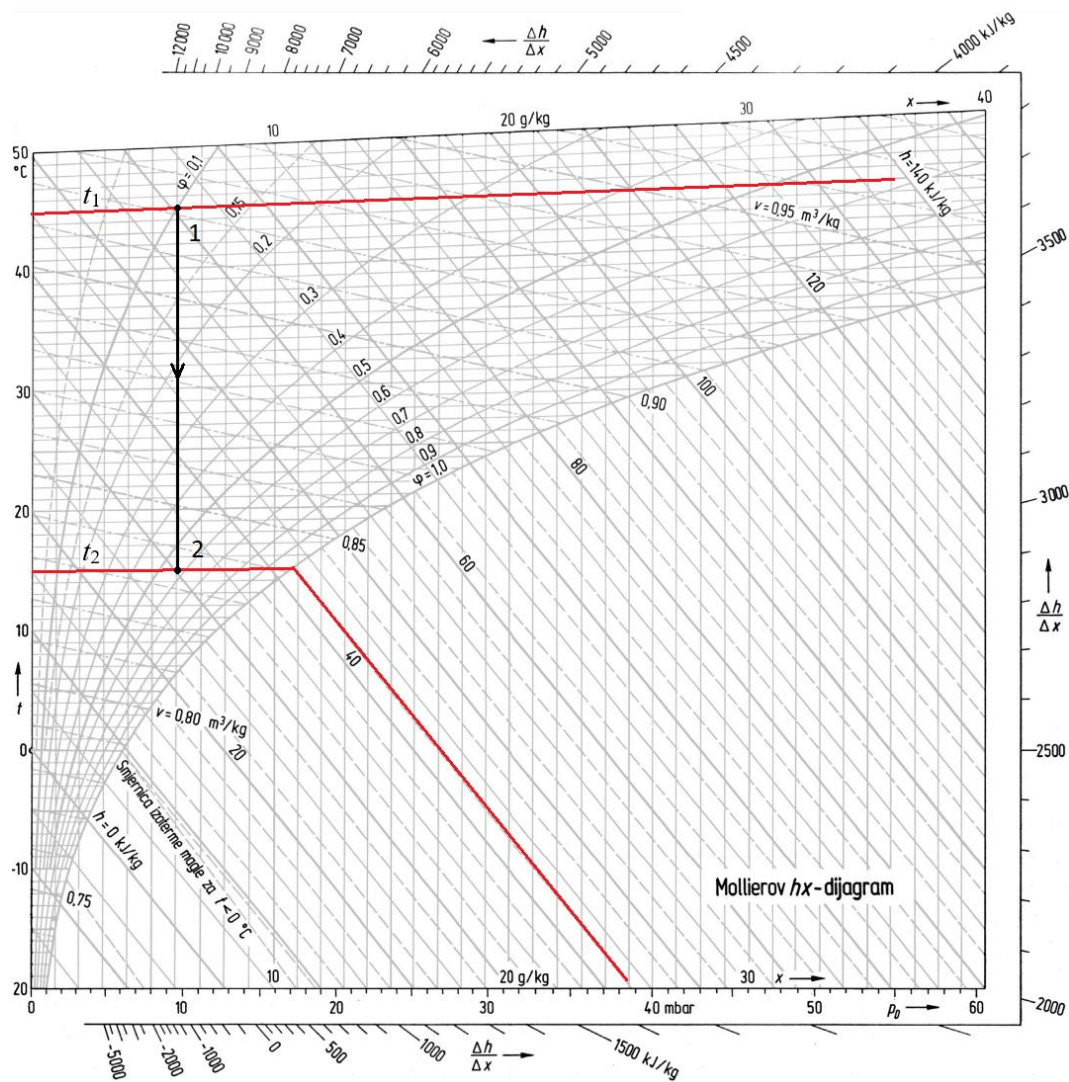


Slika 3.1 Mollierov  $h$ - $x$ -dijagram procesa grijanja zraka

### 3.2. Hlađenje vlažnog zraka

Hlađenje vlažnog zraka je promjena stanja, prikazana na slici 3.2, kod koje se zrak hladi sa temperature  $t_1$  i relativne vlažnosti  $\varphi_1$  na temperaturu  $t_2$ . U procesu se vlažnom zraku smanjuje temperatura zajedno sa specifičnom entalpijom, dok se povećava relativna vlažnost, a apsolutna vlažnost ostaje ista. Dovedena toplina računa se pomoću:

$$Q_{12} = Z \cdot (h_2 - h_1) [\text{k}] \quad (3.2)$$

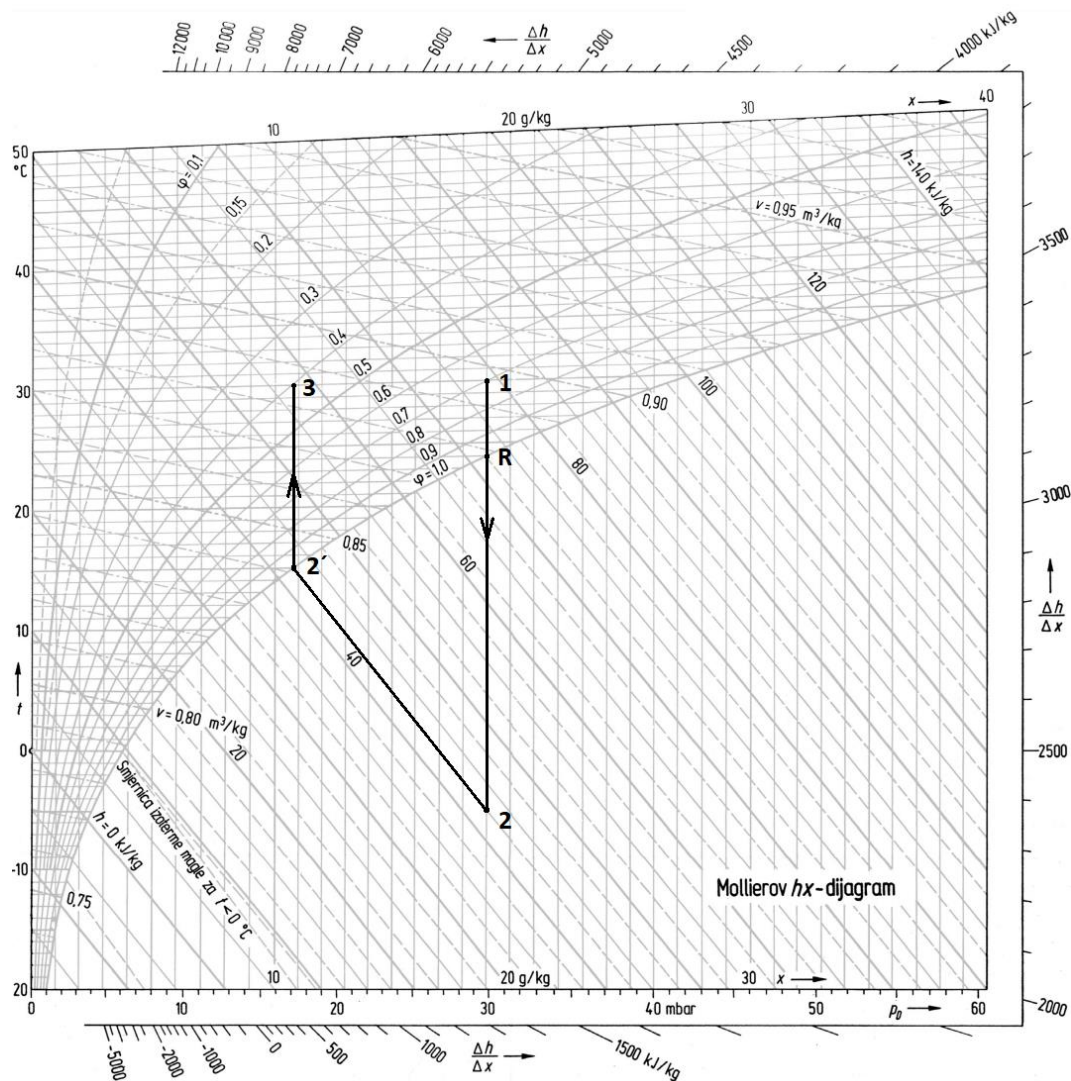


Slika 3.2 Mollierov  $h_x$ -dijagram procesa hlađenja zraka

### 3.3. Hlađenje i grijanje vlažnog zraka

Proces razvlaživanja zraka, na slici 3.3., primjenjuje se najčešće u klimatizacijskim sustavima. Sastoji se od hlađenja i grijanja vlažnog zraka, te služi za odvajanje vodene pare iz zraka.

Odvajanje vodene pare iz zraka se postiže tako da se prvo vlažni zrak hladi, oduzima mu se energija, od početne temperature do određene temperature ispod krivulje zasićenja. Hlađenjem ispod temperature rošenja se dio vodene pare kondenzira i odvaja. Zrak se nakon odvajanja kondenzirane vode ponovo zagrijava do početne temperature. Na kraju procesa se dobiva zrak iste temperature kao i na početku, ali sa manjom apsolutnom vlažnosti, tj. s manjim sadržajem vodene pare.



Slika 3.3 Mollierov  $h-x$  - dijagram procesa razvlaživanja zraka

Proces se izvodi sa dovođenjem i odvođenjem topline. Od početnog stanja, zrak se mora ohladiti te mu se oduzima toplinski tok  $Q_{12}$  u iznosu:

$$Q_{12} = Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1) \text{ [kW]} \quad (3.3)$$

Nakon odvajanja kondenzata, zrak moramo dovesti na početnu vrijednost temperature te mu se dovodi toplinski tok  $Q_{23}$  u iznosu:

$$Q_{23} = Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2) \text{ [kW]} \quad (3.4)$$

### 3.4. Miješanje zračnih struja

Proces miješanja zračnih struja, na slici 3.4, predstavlja dvije ili više zračnih struja koje se miješaju u mješalištu te se dobiva smjesa vlažnog zraka čija su svojstva različita od svojstava ulaznih struja vlažnog zraka. Novonastale veličine stanja smjese najmanje dvije različite zračne struje računaju se pomoću sljedećih izraza:

Vlažnost smjese:

$$x_m = \frac{Z_1 \cdot x_1 + Z_2 \cdot x_2}{Z_1 + Z_2} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \quad (3.5)$$

Specifična entalpija smjese:

$$h_m = \frac{Z_1 \cdot h_1 + Z_2 \cdot h_2}{Z_1 + Z_2} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (3.6)$$

Maseni udio zračne struje  $Z_1$  u smjesi  $Z_m$ :

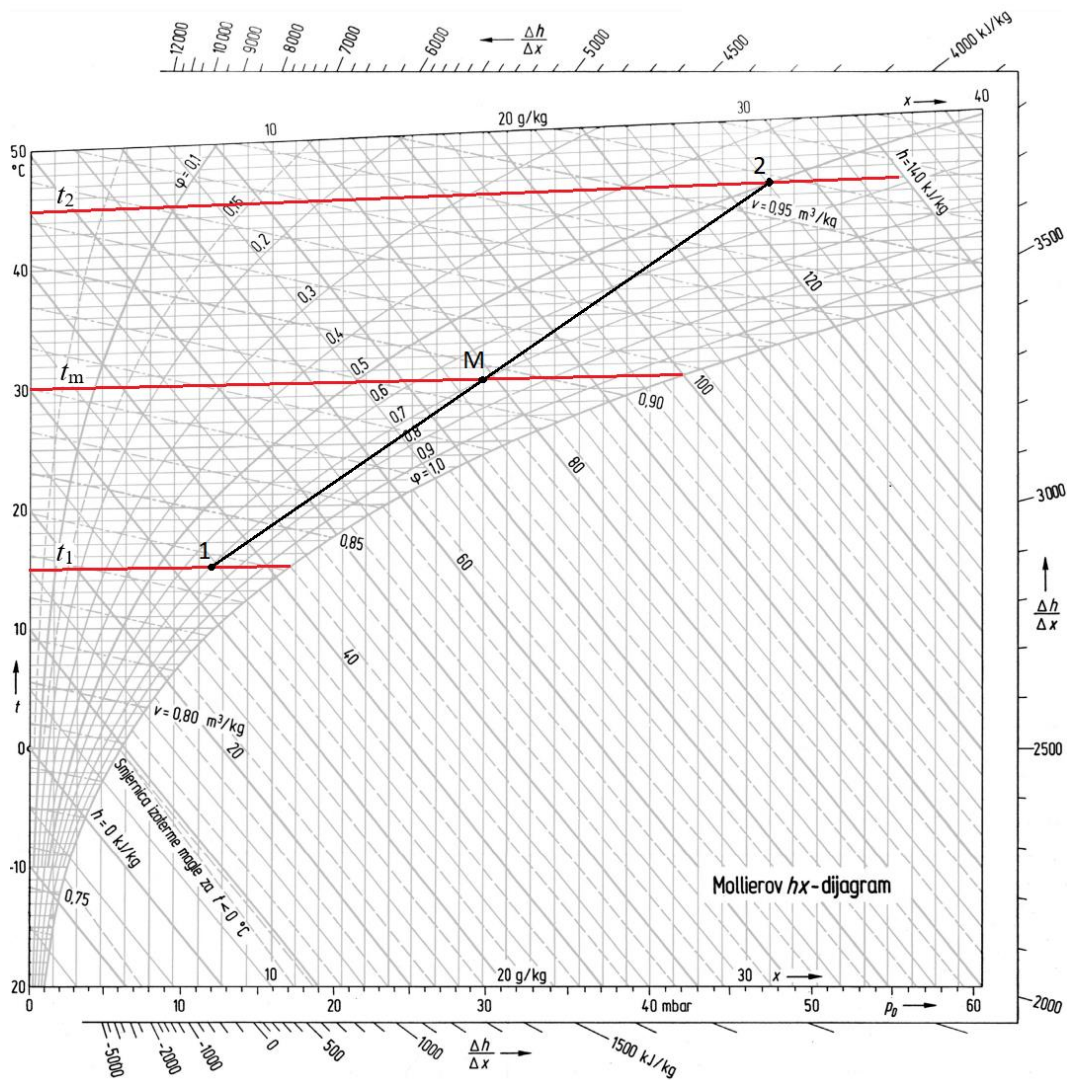
$$Z_1 = \frac{x_2 - x_m}{x_2 - x_1} = \frac{h_2 - h_m}{h_2 - h_1} \quad (3.7)$$

Maseni udio zračne struje  $Z_2$  u smjesi  $Z_m$ :

$$Z_2 = \frac{x_m - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{h_m - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.8)$$

Linearna veza stanja smjese koja se u Molliеровom  $hx - dijagramu$ , na slici 3.4, nalazi na pravcu miješanja:

$$\frac{h_2 - h_m}{x_2 - x_m} = \frac{h_m - h_1}{x_m - x_1} \quad (3.9)$$



Slika 3.4 Mollierov  $hx$  - dijagram procesa miješanja zračnih struja

### 3.5. Dodavanje vode ili vodene pare

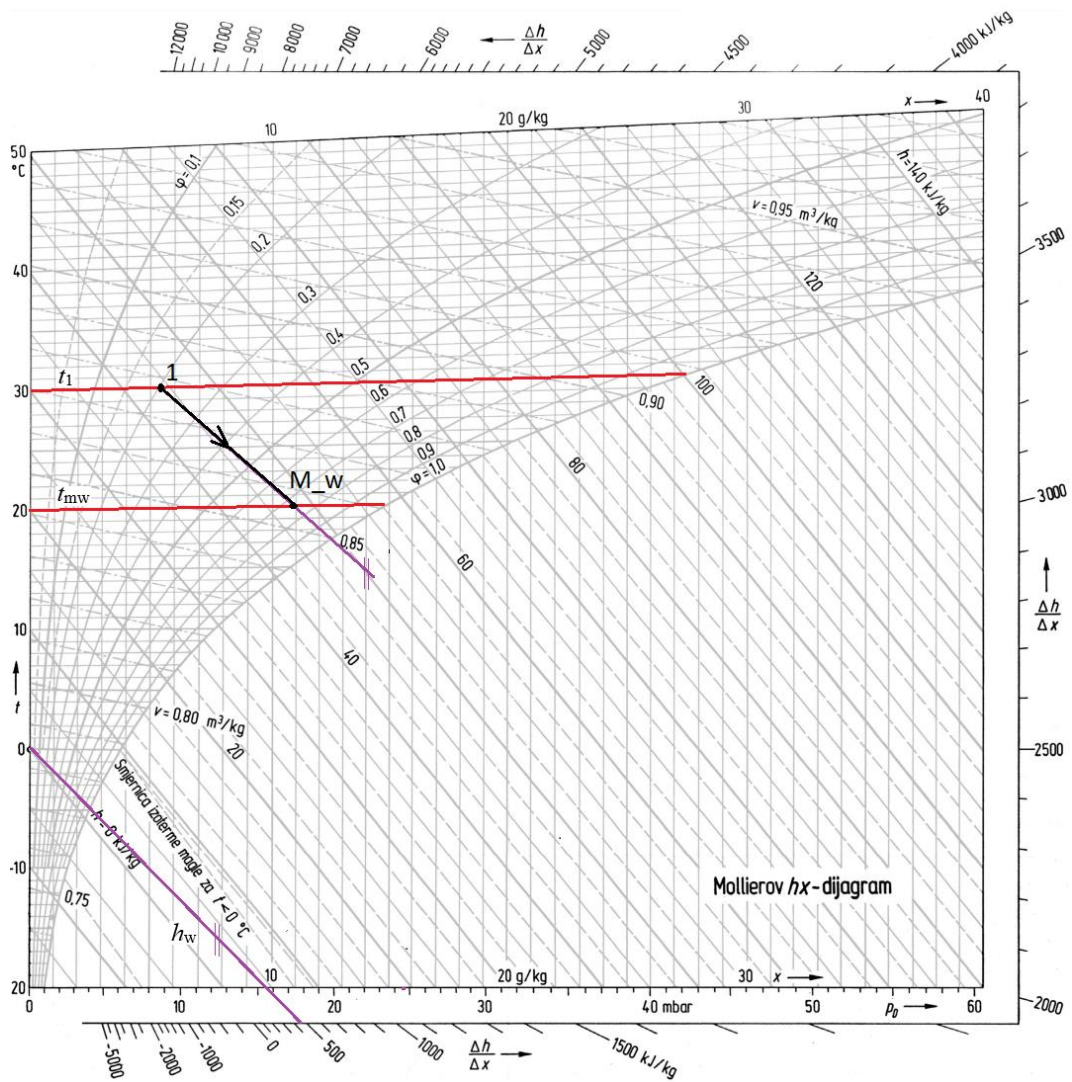
Proces dodavanja vode, na slici 3.5, je poseban slučaj miješanja vlažnog zraka sa vodom pri čemu se vlažnom zraku smanjuje temperatura, a relativna vlažnost povećava. Gdje je koeficijent nagiba pravca miješanja u Mollierovom  $hx$  – dijagramu jednak:

$$\frac{dh}{dx} = h_w \quad (3.10)$$

Dok iz bilance vode slijedi konačna apsolutna vlažnost zraka:

$$x_{mw} = x_1 + \frac{W}{Z} \quad (3.11)$$





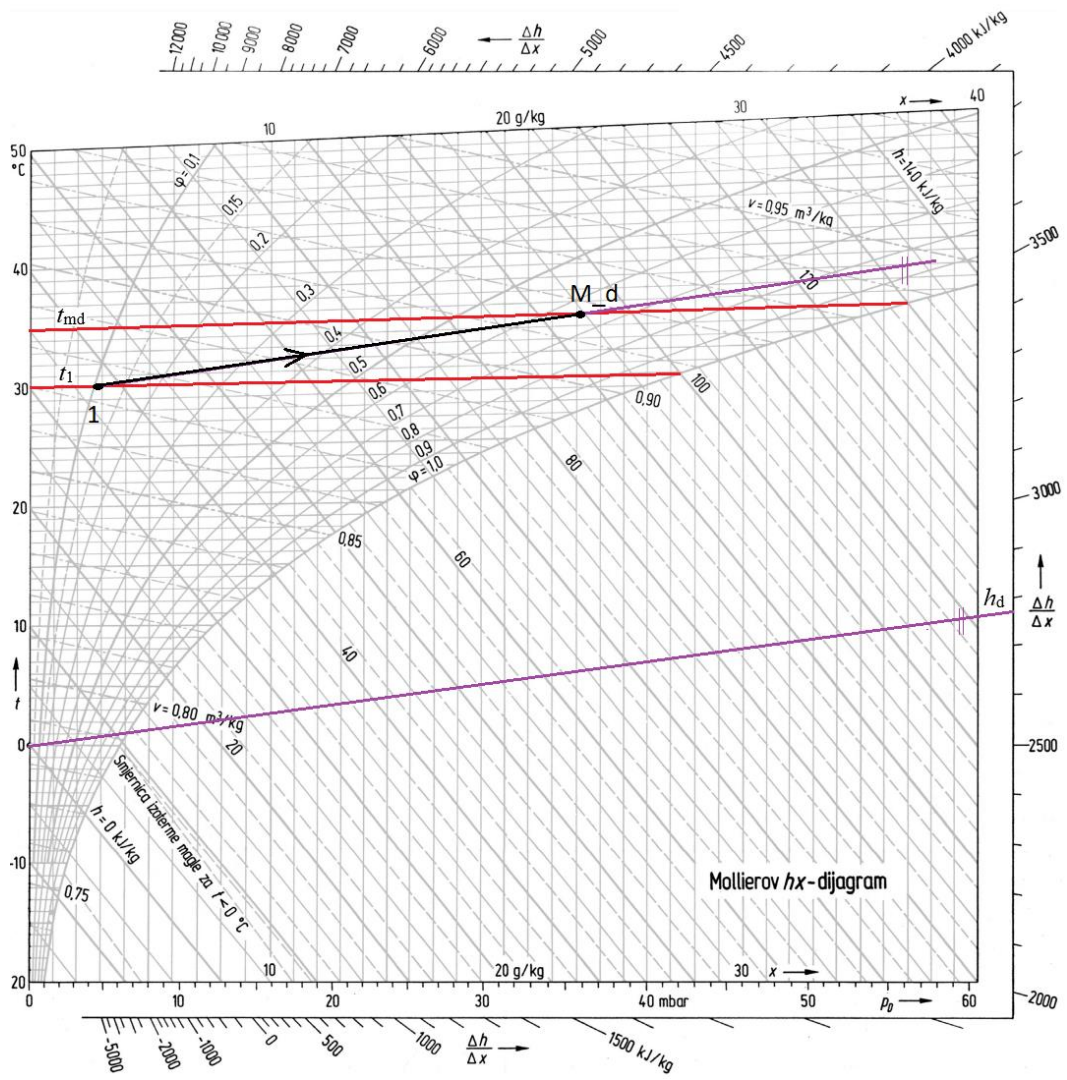
Slika 3.5 Mollierov h-x - dijagram procesa dodavanja vode vlažnom zraku

Proces dodavanja vodene pare, na slici 3.6, je poseban slučaj miješanja vlažnog zraka sa vodenom parim pri čemu se vlažnom zraku povećava temperatura i relativna vlažnost. Gdje je koeficijent nagiba pravca miješanja u Mollierovom h-x – dijagramu jednak:

$$\frac{dh}{dx} = h_d \quad (3.12)$$

Dok iz bilance vodene pare slijedi konačna apsolutna vlažnost zraka:

$$x_{md} = x_1 + \frac{D}{Z} \quad (3.13)$$



Slika 3.6 Mollierov  $h-x$  - dijagram procesa dodavanja vodene pare vlažnom zraku

## 4. UTJECAJ TEMPERATURE $t_2$ NA PROCES RAZVLAŽIVANJA VLAŽNOG ZRAKA

Za prvi zadatak zadane su vrijednosti za početnu temperaturu i relativnu vlažnost zraka koji će se koristiti za tri proračuna gdje će se mijenjati temperatura na koju hladimo vlažni zrak, dok je količina suštog zraka zadana. Cilj ovog zadatka je pokazati utjecaj hlađenja vlažnog zraka na različite temperature  $t_2$  na omjer uložene energije i količine kondenzirane vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku. Na kraju tri proračuna će biti analizirana razlika u procesima gdje se mijenja temperatura na koju se hladi vlažni zrak te izvesti zaključak.

U proračunu je potrebno odrediti sve termodinamičke veličine za karakteristične točke u procesu, a to se dobiva kada se odrede: temperatura vlažnog zraka, relativna i apsolutna vlažnost zraka i specifična entalpija.

Potrebno je proračunati proces razvlaživanja zraka za zadane ulazne podatke temperature  $t_1=30$  °C, relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1=70$  %, protoka suštog zraka  $Z=100$  kg/h, te tri različite temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2=10; 15; 20$  °C

### 4.1. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=10^\circ\text{C}$

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 70 \text{ } \%$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x}{x_G}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,7 \times 27,5 = 19,25 \text{ g/kg}$$

Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

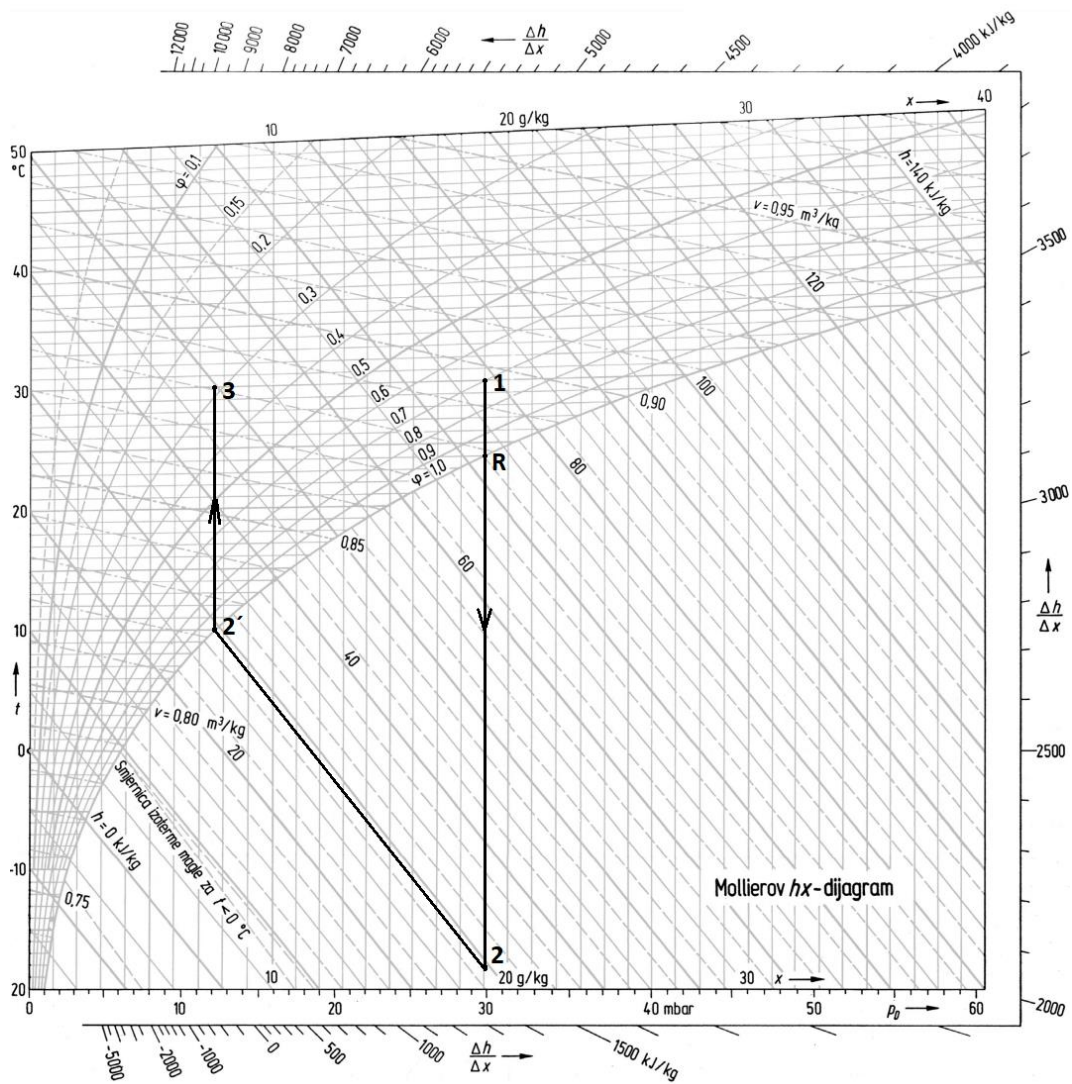
$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 19,25 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 79,4 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Mollierov  $h_x$  – dijagram.

Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 4.1 Molliereov  $hx$ -dijagram za osnovni proces sa temperaturom  $t_2=10^\circ\text{C}$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 29 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 49,5 \text{ kJ/kg}$$

Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{49,5 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 7,56 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{7,56}{27,5}$$

$$\chi = 0,275$$

Te na posljetku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 27,5 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je toplinskog toka oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Oduzeti toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (29 - 79,4)$$

$$Q_H = -5040 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -1.4 \text{ kW}$$

Dovedeni toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (49,5 - 29)$$

$$Q_G = 2050 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0.57 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (19,25 - 7,56) \cdot 100 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 1169 \text{ g/h} = 1,169 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0.0003247 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količine vodene pare potrebno je podijeliti odvedeni i dovedeni toplinski tok sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-5040}{1,169} = -4311,38 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{2050}{1,169} = 1753,64 \text{ kJ/kg}$$

Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zraku oduzelo 4311,38 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 1753,64 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo pa kilogramu izdvojene vlage.

#### 4.2. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=15^\circ\text{C}$

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 70 \%$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,7 \cdot 27,5 = 19,25 \text{ g/kg}$$

Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

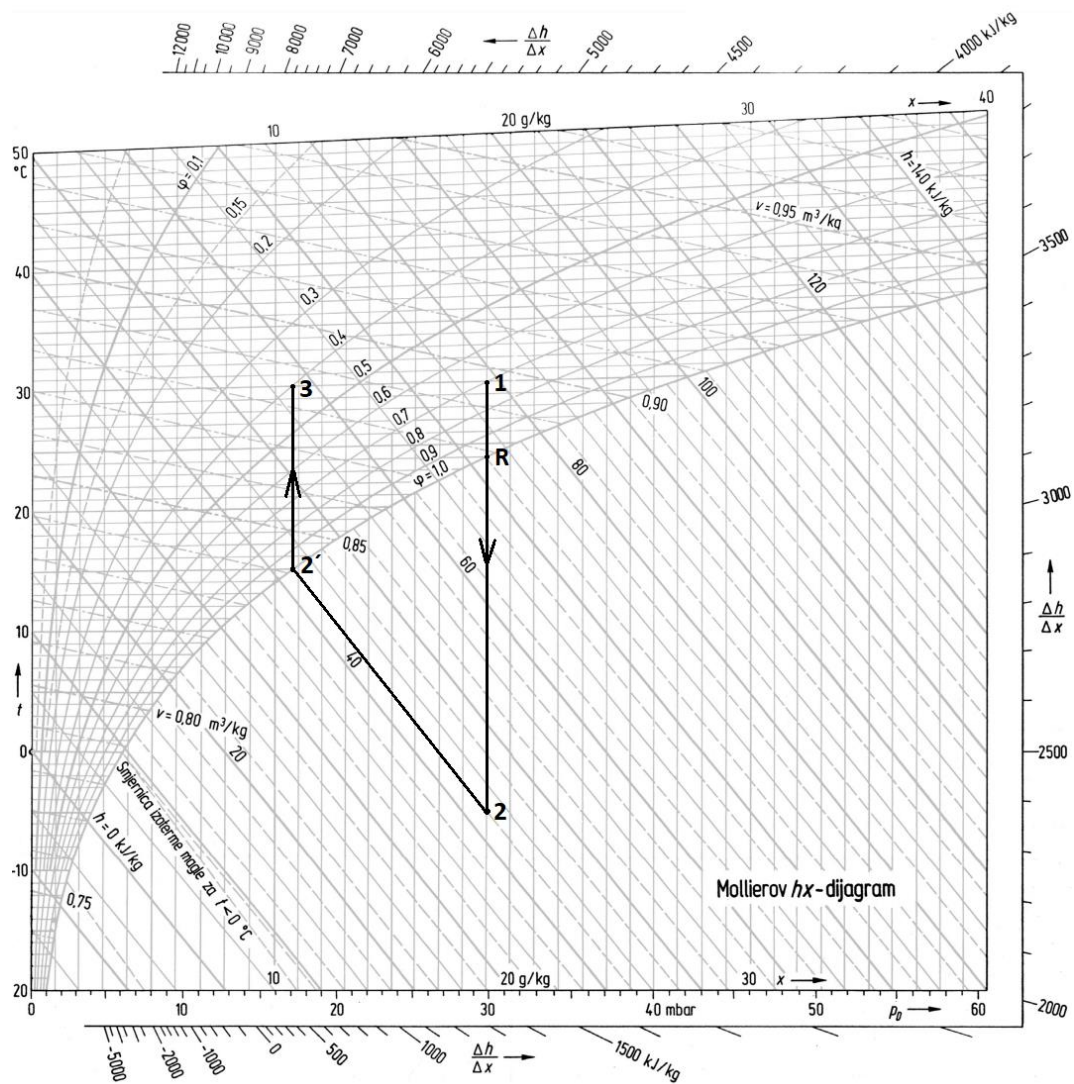
$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 19,25 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 79,4 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Mollierov  $hx$  – dijagram.

Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 4.2 Molliereov  $hx$ -dijagram za osnovni proces sa temperaturom  $t_2=15^\circ\text{C}$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 42,5 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 57,5 \text{ kJ/kg}$$



Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{57,5 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 10,69 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{10,69}{27,5}$$

$$\chi = 0,389$$

Te na posljétku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 38,9 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je toplinskog toka oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Oduzeti toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (42,5 - 79,4)$$

$$Q_H = -3690 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -1.025 \text{ kW}$$

Doveden toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (57,5 - 42,5)$$

$$Q_G = 1500 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0.417 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (19,25 - 10,69) \cdot 100 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 856 \text{ g/h} = 0,856 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0.000238 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količina vodene pare potrebno je podijeliti oduzetu i dovedenu toplinu sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-3690}{0,856} = -4310,75 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{1500}{0,856} = 1752,34 \text{ kJ/kg}$$

Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zraku oduzelo 4310,75 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 1752,34 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo po kilogramu izdvojene vlage.

### 4.3. Proračun procesa razvlaživanja za $t_2=20^\circ\text{C}$

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 70 \text{ \%}$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,7 \cdot 27,5 = 19,25 \text{ g/kg}$$

Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

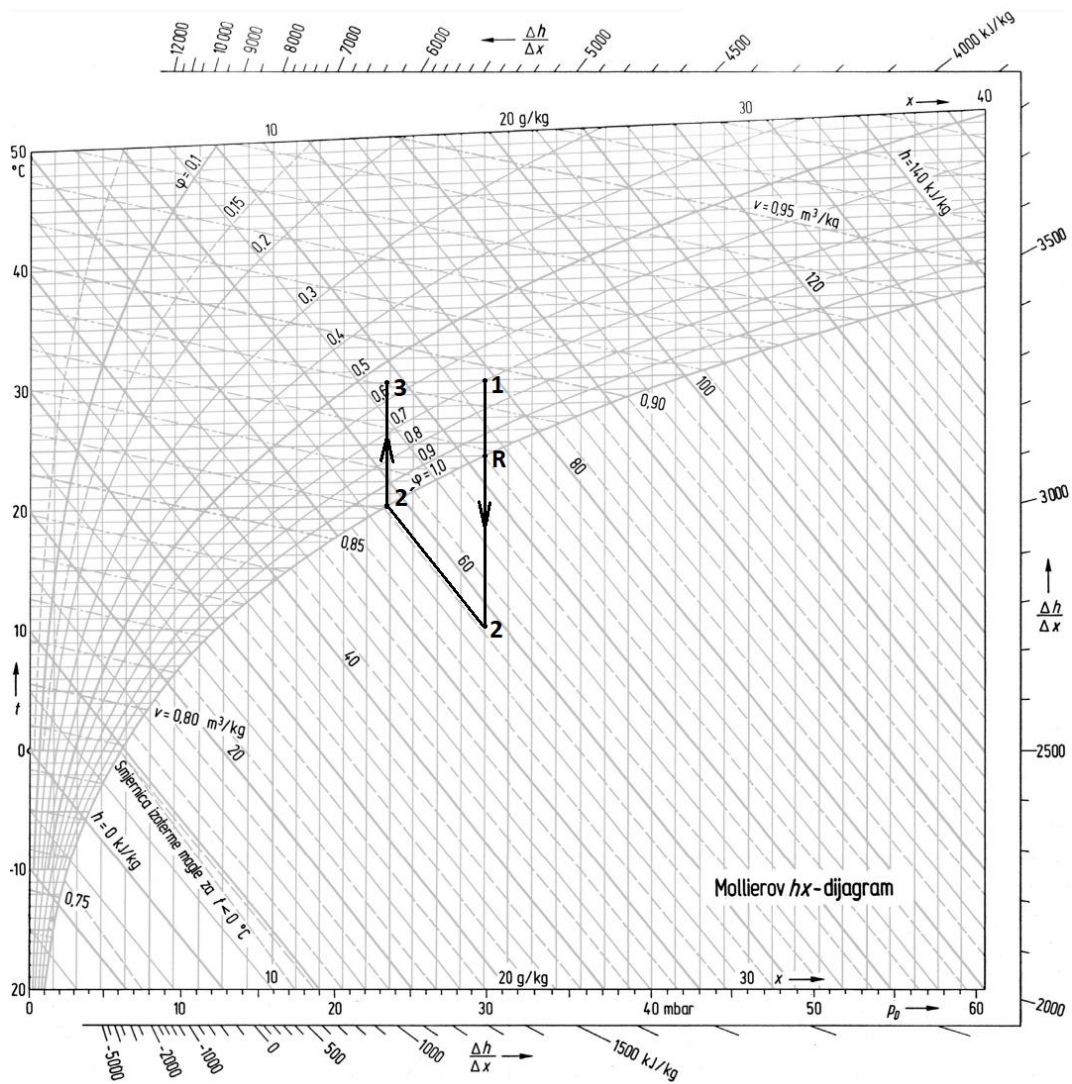
$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 19,25 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 79,4 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Mollierov  $h_x$  – dijagram.

Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 4.3 Molliereov  $hx$ -dijagram za osnovni proces sa temperaturom  $t_2=20^\circ\text{C}$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 58 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 68 \text{ kJ/kg}$$

Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{68 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 14,8 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{14,8}{27,5}$$

$$\chi = 0,538$$

Te na posljetku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 53,8 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je toplinskog toka oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Odvedeni toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (58 - 79,4)$$

$$Q_H = -2140 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -0.594 \text{ kW}$$

Dovedeni toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (68 - 58)$$

$$Q_G = 1000 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0.278 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (19,25 - 14,8) \cdot 100 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 445 \text{ g/h} = 0,445 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0,0001236 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količine vodene pare potrebno je podijeliti oduzeti i dovedeni toplinski tok sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

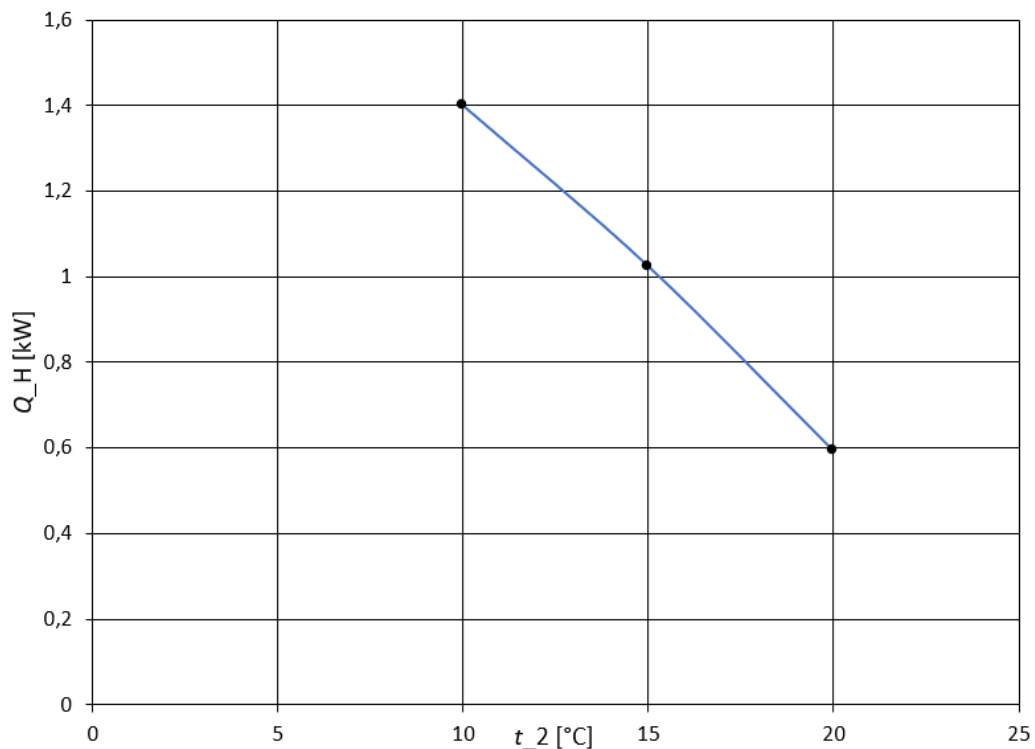
$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-2140}{0,445} = -4808,99 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{1000}{0,445} = 2247,19 \text{ kJ/kg}$$

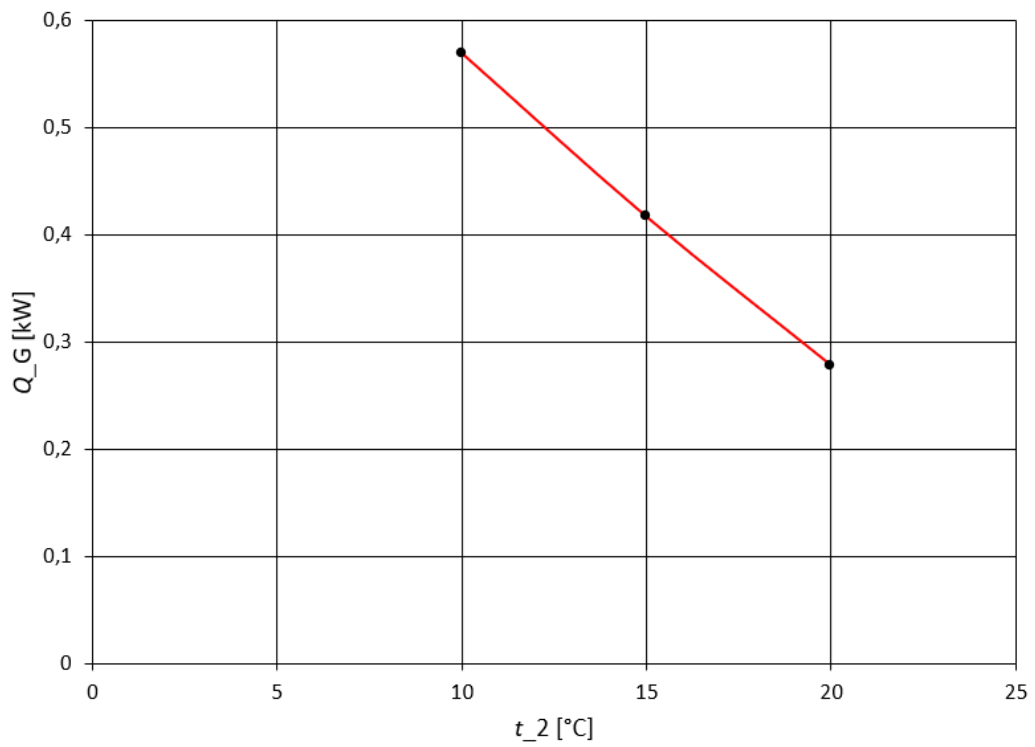
Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zraku oduzelo 4808,99 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 2247,19 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo po kilogramu izdvojene vlage.

#### 4.4. Utjecaj promijene temperature $t_2$ na proces razvlaživanja

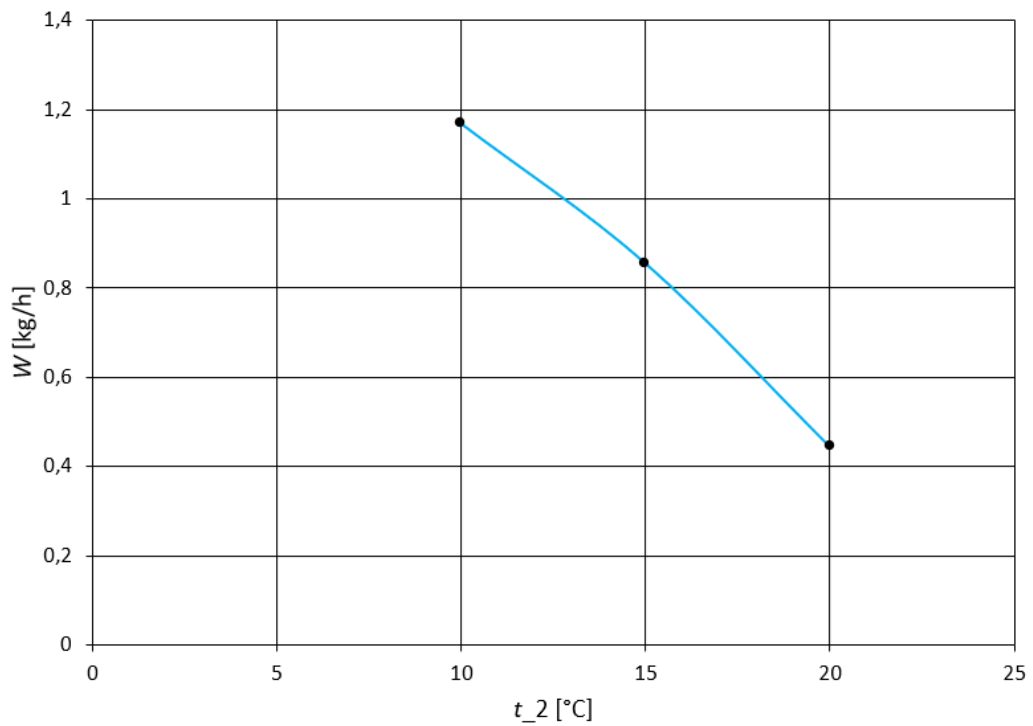
U sljedećim grafovima se može vidjeti kako se mijenjaju vrijednosti oduzete  $Q_H$  i dovedene topline  $Q_G$  te izdvojene količine vodene pare  $W$  sa promjenom temperature  $t_2$  na koju se vlažni zrak hladi.



Slika 4.4 Dijagram ovisnosti oduzetog toplinskog toka  $Q_H$  o temperaturama  $t_2$



Slika 4.5 Dijagram ovisnosti dovedenog toplinskog toka  $Q_G$  o temperaturama  $t_2$



Slika 4.6 Dijagram ovisnosti izdvojene količine vodene pare  $W$  o različitim temperaturama  $t_2$

Iz priloženih dijagrama se može izvesti zaključak da promjena temperature  $t_2$  na koju se vlažni zrak hladi također gotovo linearno utječe na promjenu oduzetog  $Q_H$  i dovedenog  $Q_G$  toplinskog tokate izdvojene količine vodene pare  $W$ .

Očitavanjem iz grafova se vidi da povećanjem temperature  $t_2$  na koju se vlažni zrak hladi, uz konstantnu temperaturu početnog stanja  $t_1$  i relativnu vlažnosti zraka  $\varphi_1$ , se smanjuje apsolutna vrijednost oduzete topline  $Q_H$ . Što ima smisla jer povećanjem temperature  $t_2$  se povećava vrijednost specifične entalpije  $h_2$  u stanju 2. Povećanjem vrijednosti specifične entalpije  $h_2$  u stanju 2 stvara se manja razlika između specifične entalpije početnog stanja  $h_1$  i specifične entalpije stanja  $h_2$  koje ima određenu temperaturu na koju se hladi vlažni zrak. Smanjivanjem razlike specifičnih entalpija rezultira manjom apsolutnom vrijednosti odvedene topline  $Q_H$ , što se vidi i iz izraza (3.1).

Toplina  $Q_G$  koju je potrebno predati zraku također se smanjuje zbog istog razloga. Predana toplina  $Q_G$  se smanjuje jer povećanjem temperature  $t_2$  se povećava vrijednost specifične entalpije  $h_2$  u stanju 2. Dok se vrijednost specifične entalpije  $h_3$  u stanju 3 također povećava sa povećanjem temperature  $t_2$ , no sporije nego vrijednost specifične entalpije  $h_2$ . Zbog sporije promjene vrijednost specifične entalpije  $h_3$  u odnosu na promjene vrijednost specifične entalpije  $h_2$ , razlika između specifičnih entalpija se smanjuje te time i vrijednost predane topline  $Q_G$  se smanje što se može vidjeti i iz izraza (3.2).

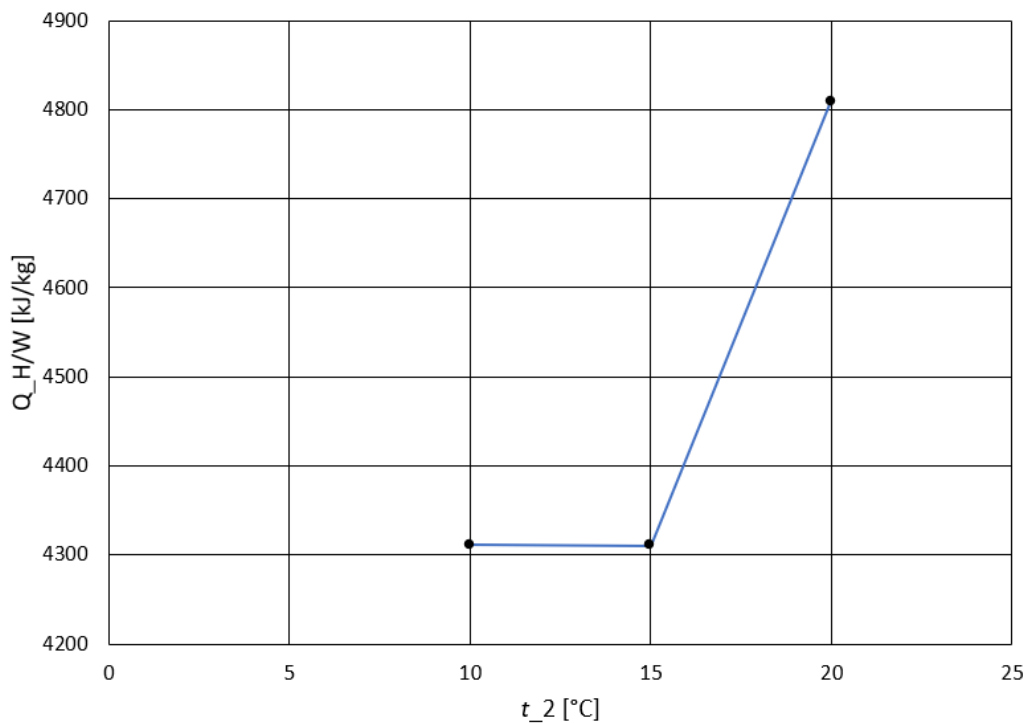
Količina vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka se smanjuje sa porastom temperature  $t_2$ . Što ima smisla, jer povećanje temperature  $t_2$  se povećava i temperatura rošenja  $t_R$  zajedno sa apsolutnom vlažnošću zraka  $x_3$  u stanju 3. Povećanjem temperature rošenja  $t_R$  zajedno sa apsolutnom vlažnošću zraka  $x_3$  u stanju 3 se smanjuje razlika u vrijednostima apsolutnih vlažnosti zraka u stanjima 1 i 3. Potom iz izraza (2.1) se vidi da se sa promjenom apsolutne vlažnosti zraka mijenja i količina vodene pare u stanjima 1 i 3. Gdje se smanjivanjem razlike u vrijednostima apsolutnih vlažnosti zraka automatski smanjuje i razlika u vrijednostima količine vodene pare u stanjima 1 i 3.

Prvi dio analize se izvodio sa promjenom temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2$  uz konstantne temperature početnog stanja  $t_1$ , relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$  i količinu suštog zraka  $Z$ . Iz dobivenih rezultata se na slici 6.1 prikazan je omjer odvedenog toplinskog toka  $Q_H$  i količine vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka, te na slici 6.2 prikazan je omjer predanog toplinskog toka  $Q_G$  i količine vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka. Iz kojih se vidi kako se kod temperature  $t_2=15^\circ\text{C}$  najmanje mora odvesti i predati toplinskog toka, dok povećanjem temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2$  se povećava i apsolutna vrijednost topline po kilogramu vlažnog zraka koju je potrebno oduzeti i predati vlažnom zraku u procesu razvlaživanja.

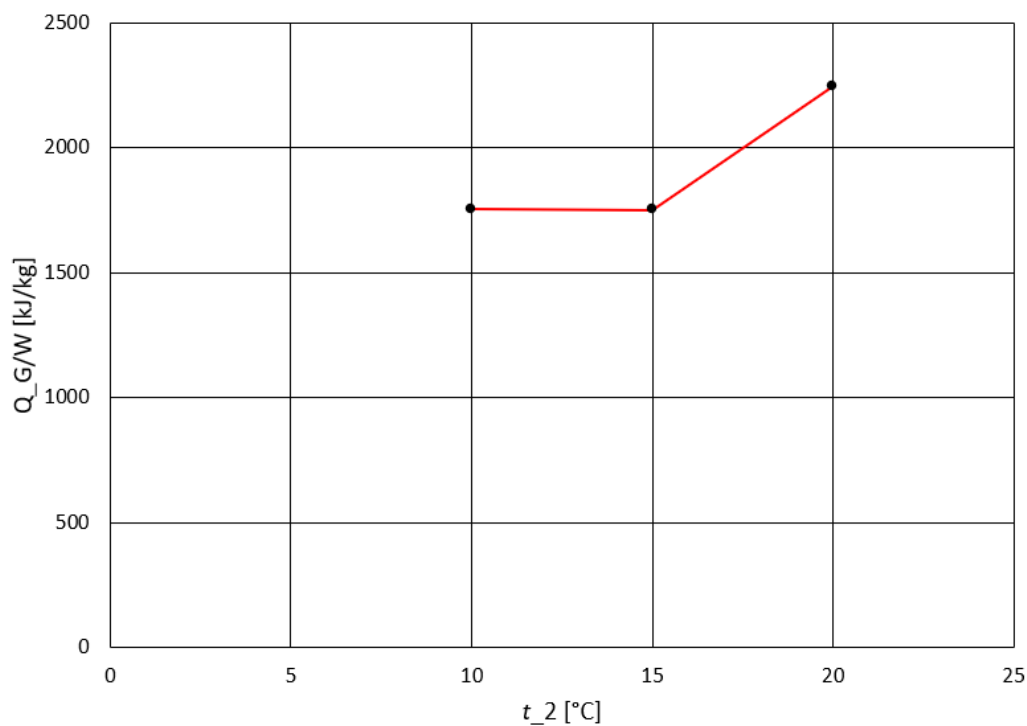


Tablica 4.1 Podaci izdvojene količine vode te odvedene i dovedene topline za različite temperature  $t_2$

$t_2$ [°C]	$W$ [kg/h]	$Q_H/W$ [kg/kJ]	$Q_G/W$ [kg/kJ]
10	1,169	4311,38	1753,64
15	0,856	4310,75	1752,34
20	0,445	4808,99	2247,19



Slika 4.7 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka  $Q_H$  i količine vodene pare  $W$  sa promjenom temperature  $t_2$



Slika 4.8 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka  $Q_G$  i količine vodene pare  $W$  sa promjenom temperature  $t_2$

## 5. UTJECAJ POČETNE RELATIVNE VLAŽNOSTI ZRAKA $\varphi_1$ NA PROCES RAZVLAŽIVANJA VLAŽNOG ZRAKA

Za drugi zadatak potrebno je istražiti utjecaj početne relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$ , s time da su ostale vrijednosti temperatura i protok suštog zraka konstantni. Cilj ovog zadatka je da se odredi omjer uložene energije i količine kondenzirane vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, te provjeriti da li se promjenom relativne vlažnosti zraka utječe na efikasnost procesa. Na kraju proračuna će se analizirati razlika u procesima te izvesti zaključak.

U proračunu je potrebno odrediti sve termodinamičke vrijednosti svake točke u procesu, a to se dobiva kada se odrede: temperatura vlažnog zraka, relativna i apsolutna vlažnost zraka i specifična entalpija.

Potrebno je proračunati proces razvlaživanja zraka za zadane ulazne podatke temperature  $t_1=30$  °C, temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2=15$  °C relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1=70$  %, protoka suštog zraka  $Z=100$  kg/h, te tri različite relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1=50; 70; 90$  %

### 5.1. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=50$ %

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ °C}$$

$$t_2 = 15 \text{ °C}$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$\varphi_1 = 50 \text{ %}$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,5 \cdot 27,5 = 13,5 \text{ g/kg}$$

Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

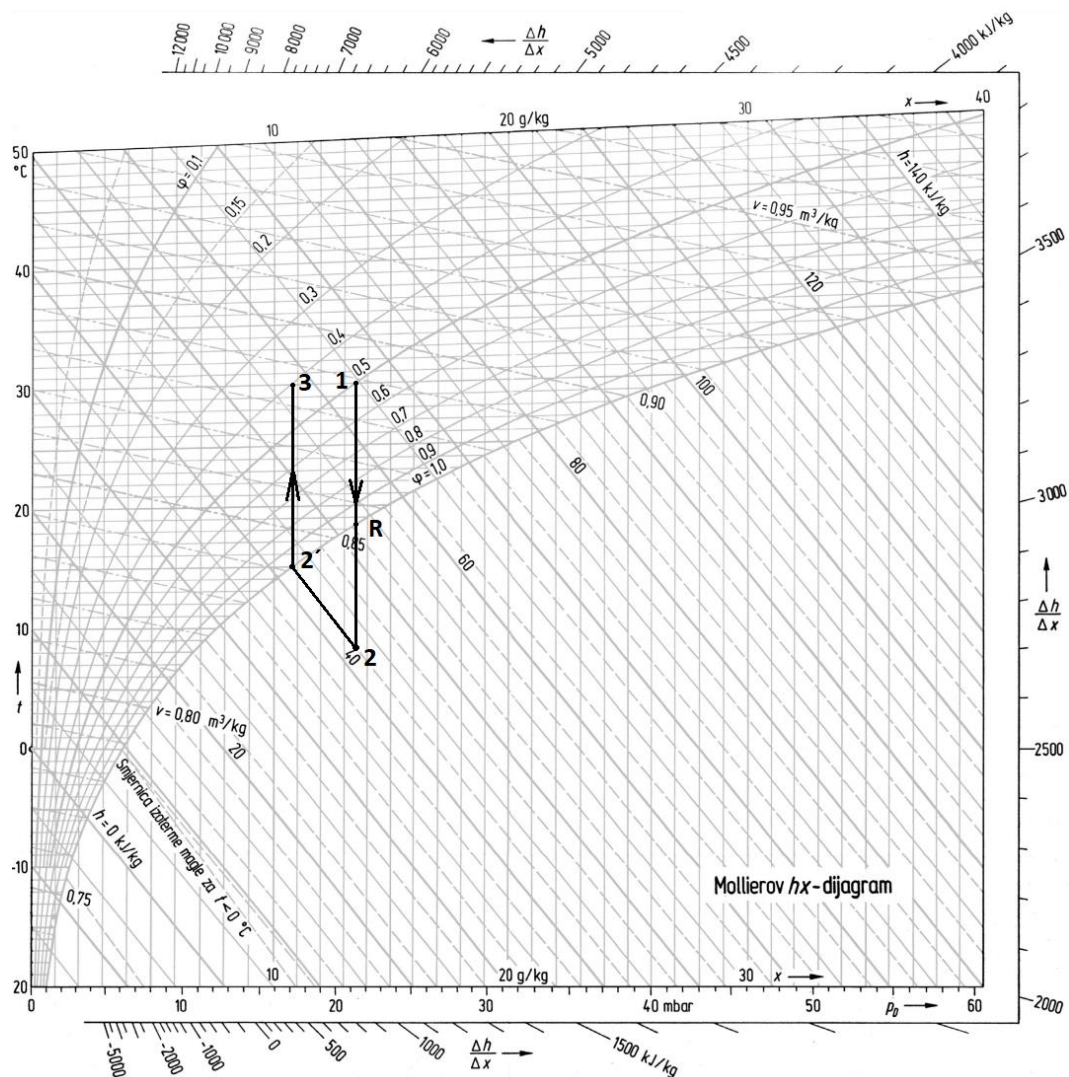
$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 13,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 64,68 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Molliero  $h_x$  – dijagram.

Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 5.1 Molliero  $h_x$ -dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti  $\phi_1=50\%$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 42,5 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 57,5 \text{ kJ/kg}$$

Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{57,5 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 10,69 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{10,69}{27,5}$$

$$\chi = 0,389$$

Te na posljetku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 38,9 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je topline oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Oduzet toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (42,5 - 64,68)$$

$$Q_H = -2218 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -0,6161 \text{ kW}$$

Dovedeni toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (57,5 - 42,5)$$

$$Q_G = 1500 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0,417 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$W_{13} = (13,5 - 10,69) \cdot 100 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 281 \text{ g/h} = 0,281 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0,0000781 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količine vodene pare potrebno je podijeliti oduzeti i dovedeni toplinski tok sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-2218}{0,281} = -7893,24 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{1500}{0,281} = 5338,08 \text{ kJ/kg}$$

Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zraku oduzelo 7893,24 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 5338,08 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo po kilogramu izdvojene vlage.

## 5.2. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=70\%$

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$\varphi_1 = 70 \%$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,7 \times 27,5 = 19,25 \text{ g/kg}$$

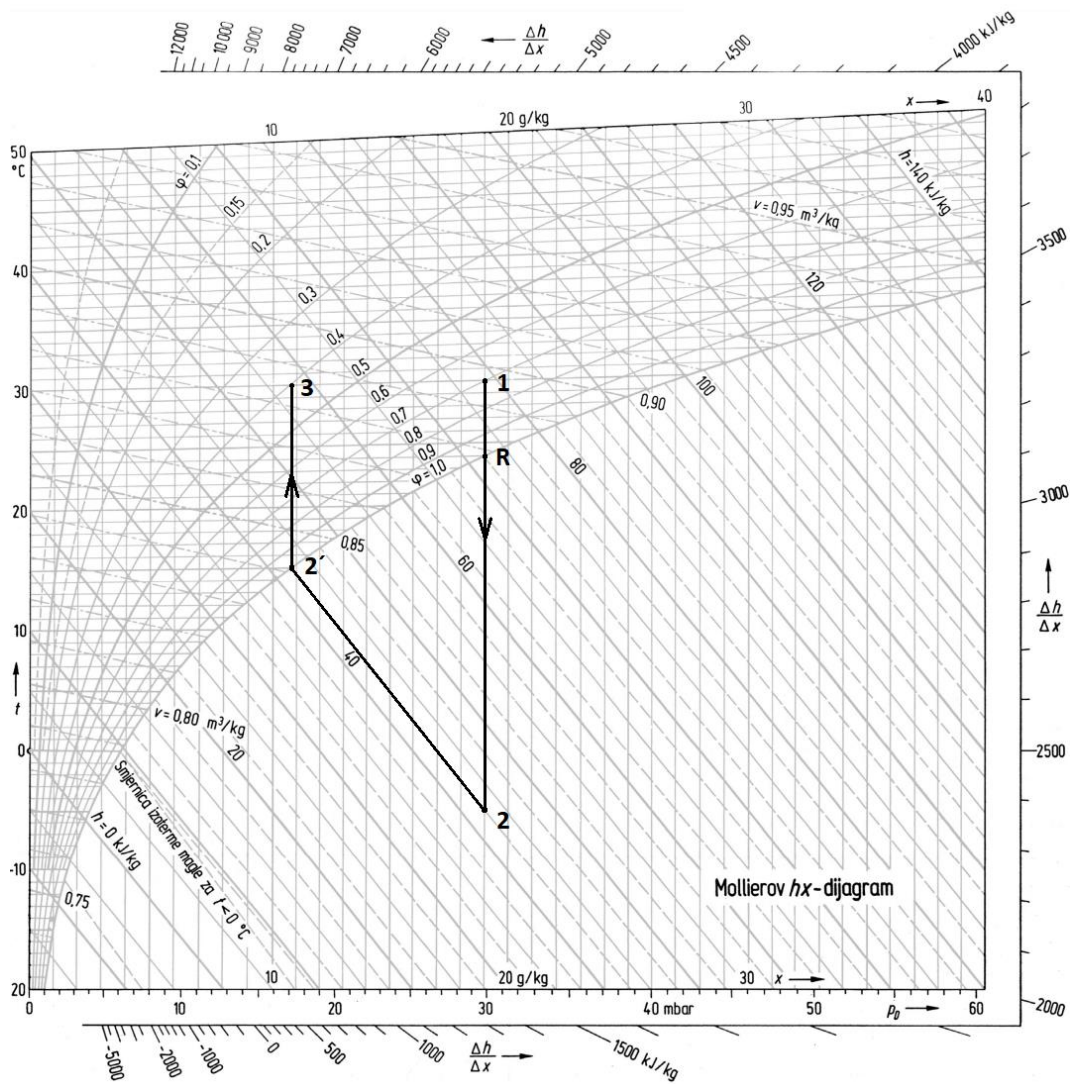
Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 19,25 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 79,4 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Mollierov  $h_x$  – dijagram. Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 5.2 Molliereov  $hx$ -dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti  $\varphi_1=70\%$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 42,5 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 57,5 \text{ kJ/kg}$$

Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{57,5 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 10,69 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{10,69}{27,5}$$

$$\chi = 0,389$$

Te na posljetku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 38,9 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je topline oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Oduzet toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (42,5 - 79,4)$$

$$Q_H = -3690 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -1,025 \text{ kW}$$

Doveden toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (57,5 - 42,5)$$

$$Q_G = 1500 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0,417 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$W_{13} = (19,25 - 10,69) \cdot 100 \text{ kg/h}$$



$$W_{13} = 856 \text{ g/h} = 0,856 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0,0002378 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količine vodene pare potrebno je podijeliti oduzet i doveden toplinski tok sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-3690}{0,856} = -4310,75 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{1500}{0,856} = 1752,34 \text{ kJ/kg}$$

Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zrak oduzelo 4310,75 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 1752,34 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo po kilogramu izdvojene vlage.

### 5.3. Proračun procesa razvlaživanja za $\varphi_1=90\%$

Zadani ulazni podaci:

$$t_1 = t_3 = 30 \text{ °C}$$

$$t_2 = 15 \text{ °C}$$

$$Z = 100 \text{ kg/h}$$

$$\varphi_1 = 90 \%$$

Proračun započinje izračunavanjem apsolutne vlažnosti zraka u točki početnog stanja vlažnog zraka. Iz tablica se očitava apsolutna vlažnost zasićenog zraka  $x_g$ :

$$x_g = 27,5 \text{ g/kg}$$

Pošto se zna da stupanj zasićenja i relativna vlažnost zraka imaju približno jednake vrijednosti  $\chi \approx \varphi$ , potom se izračunava apsolutna vlažnost zraka pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$x_1 = \chi \cdot x_g$$

$$x_1 = 0,9 \cdot 27,5 = 24,75 \text{ g/kg}$$

Za početno stanje se izračunava specifična entalpija pomoću izraza (2.10):

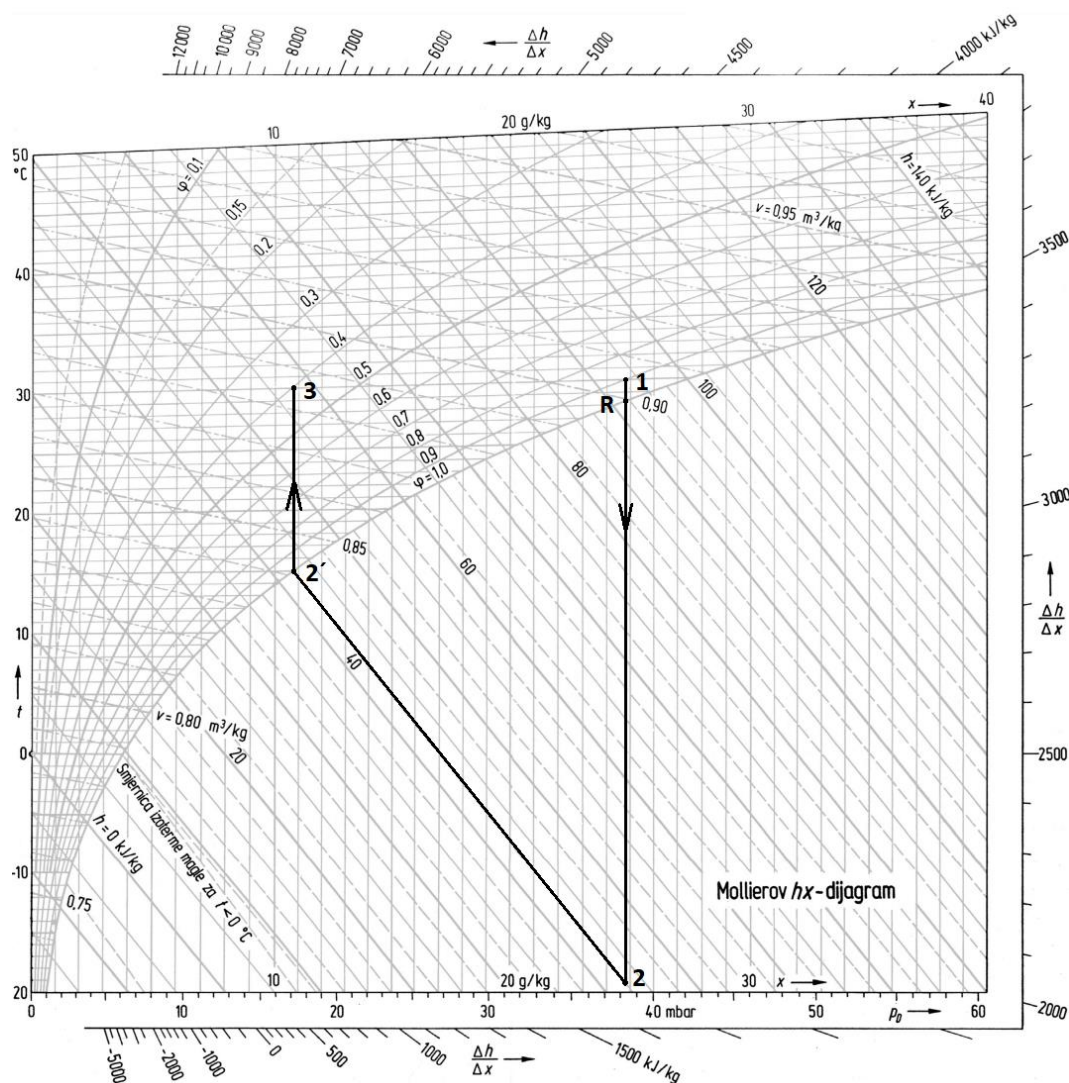
$$h_1 = c_{pz} \cdot t_1 + x_1 \cdot (c_{pd} \cdot t_1 + r_0)$$

$$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 24,75 \cdot 10^{-3} \cdot (1,93 \cdot 30 + 2500)$$

$$h_1 = 93,46 \text{ kJ/kg}$$

Vrijednosti za početno stanje procesa su određene te se dalje ucrtavaju u Mollierov  $hx$  – dijagram.

Vrijednosti u ostalim točkama procesa se očitavaju iz dijagrama.



Slika 5.3 Molliereov  $hx$ -dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti  $\phi_1=90\%$

Za točku 2 i 2' sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_2 = h_{2'} = 42,5 \text{ kJ/kg}$$

Za točku 3 sa dijagrama se očitava vrijednost specifične entalpije:

$$h_3 = 57,5 \text{ kJ/kg}$$

Dalje se izračunava vrijednost apsolutne vlažnosti zraka pomoću izraza (2.10):

$$h_3 = c_{pz} \cdot t_3 + x_3 \cdot (c_{pd} \cdot t_3 + r_0)$$

$$x_3 = \frac{h_3 - c_{pz} \cdot t_3}{c_{pd} \cdot t_3 + r_0}$$

$$x_3 = \frac{57,5 - 1,005 \cdot 30}{1,93 \cdot 30 + 2500}$$

$$x_3 = 10,69 \text{ g/kg}$$

Stupanj zasićenosti zraka se izračunava pomoću izraza (2.7):

$$\chi = \frac{x_1}{x_g}$$

$$\chi = \frac{10,69}{27,5}$$

$$\chi = 0,389$$

Te na posljetku se dobiva vrijednost relativne vlažnosti zraka iz izraza (2.8):

$$\chi \approx \varphi$$

$$\varphi \approx 38,9 \%$$

Nadalje je potrebno iz dobivenih podataka izračunati koliko je topline oduzeto i predato vlažnom zraku u procesu, a to se izračunava pomoću sljedećih izraza.

Oduzet toplinski tok prilikom hlađenja vlažnog zraka na temperaturu ukapljivanja računa se iz izraza (3.1):

$$Q_H = Z \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_H = 100 \cdot (42,5 - 93,46)$$

$$Q_H = -5096 \text{ kJ/h}$$

$$Q_H = -1,4156 \text{ kW}$$

Doveden toplinski tok prilikom zagrijavanja vlažnog zraka na početnu temperaturu računa se iz izraza (3.2):

$$Q_G = Z \cdot (h_3 - h_2)$$

$$Q_G = 100 \cdot (57,5 - 42,5)$$

$$Q_G = 1500 \text{ kJ/h}$$

$$Q_G = 0,417 \text{ kW}$$

Sljedeće se računa količina vodene pare koja je oduzeta vlažnom zraku, tj. koliko je kondenzirane vode izvučeno iz vlažnog zraka. Računa se pomoću izraza (2.1):

$$W_{13} = W_1 - W_3 \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = x_1 \cdot Z - x_3 \cdot Z \text{ [kg/h]}$$

$$W_{13} = (x_1 - x_3) \cdot Z \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$W_{13} = (24,75 - 10,69) \cdot 100 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 1406 \text{ g/h} = 1,406 \text{ kg/h}$$

$$W_{13} = 0,0003906 \text{ kg/s}$$

Kako bi se vidio omjer uložene energije naspram izdvojene količine vodene pare potrebno je podijeliti oduzet i doveden toplinski tok sa količinom ukapljene vodene pare koja je kondenzirala, a to iznosi:

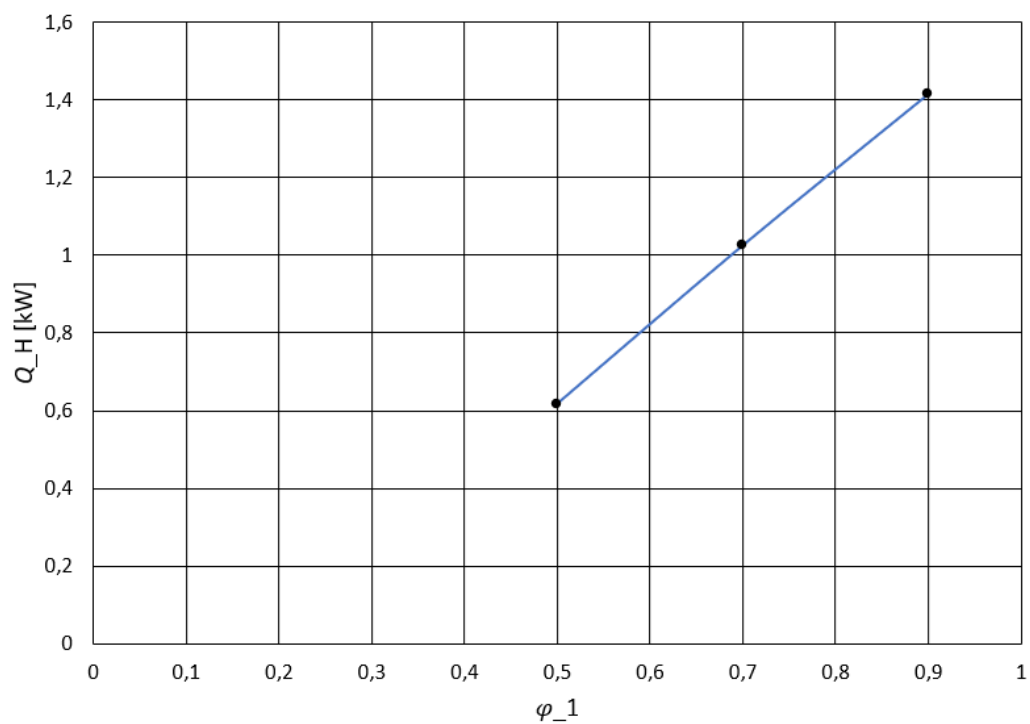
$$\frac{Q_H}{W} = \frac{-5096}{1,406} = -3624,47 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{Q_G}{W} = \frac{1500}{1,406} = 1066,85 \text{ kJ/kg}$$

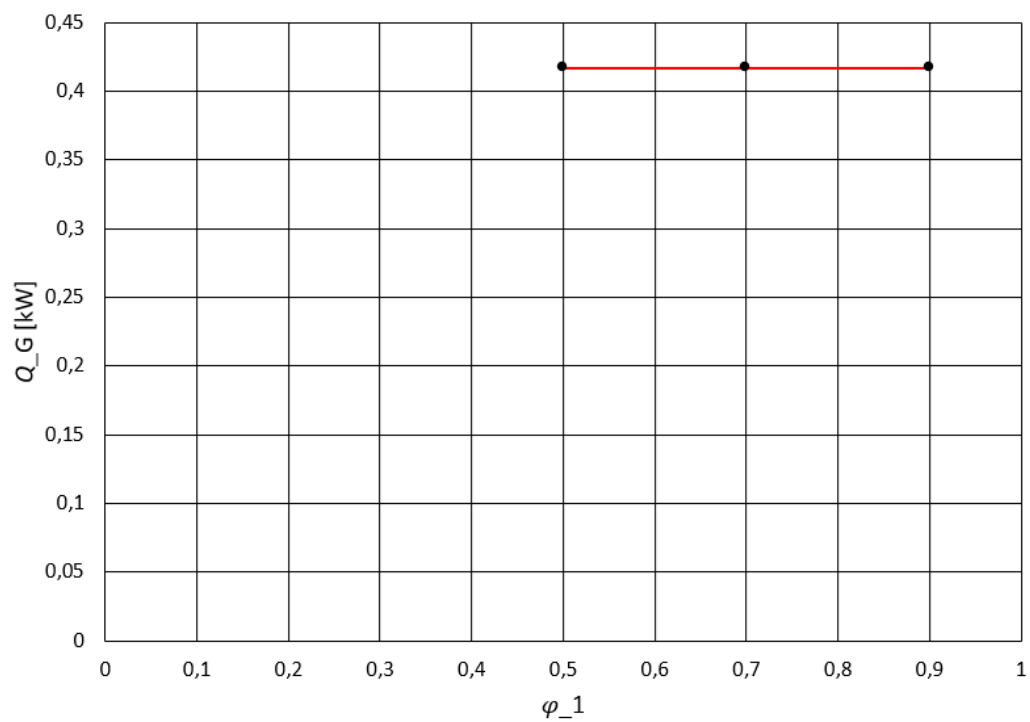
Iz dobivenog vidi se da se vlažnom zrak oduzelo 3624,47 kJ/kg topline prilikom hlađenja, te joj je zatim dovedeno 1066,85 kJ/kg topline prilikom ponovnog zagrijavanja na vrijednost početne temperature, sve izraženo po kilogramu izdvojene vlage.

#### 5.4. Utjecaj promjene relativne vlažnosti $\phi_1$ na proces razvlaživanja

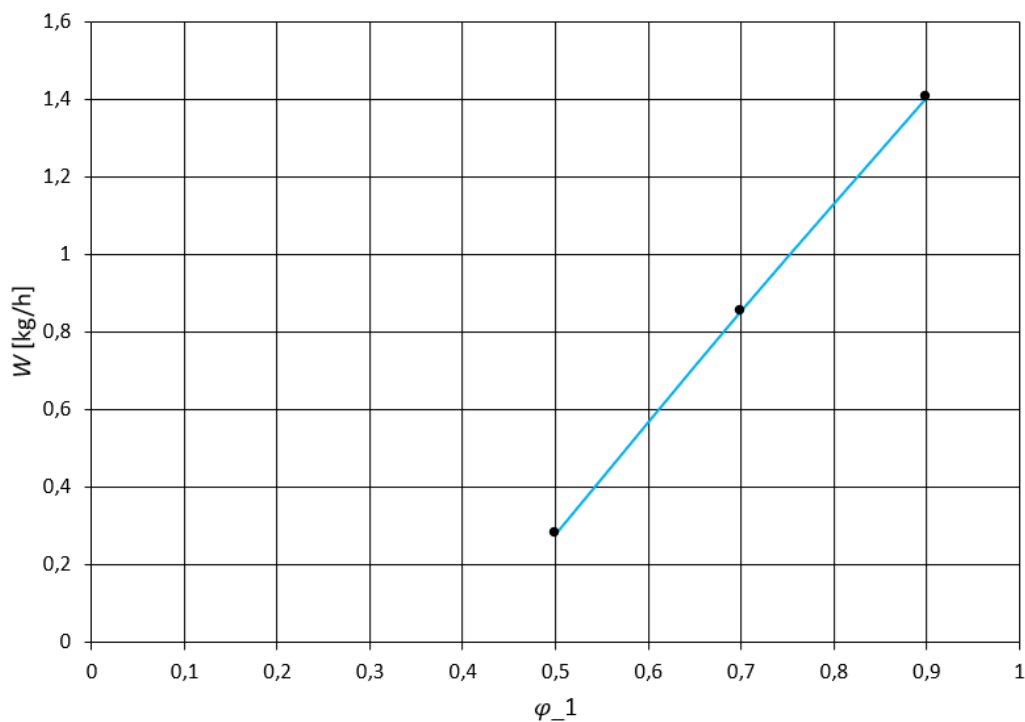
U sljedećim grafovima se može vidjeti kako se mijenjaju vrijednosti oduzete  $Q_H$  i dovedene topline  $Q_G$  te izdvojene količine vodene pare  $W$  sa promjenom relativne vlažnosti  $\phi_1$  vlažnog zraka na početku procesa.



Slika 5.4 Dijagram oduzetog toplinskog toka  $Q_H$  pri različitim relativnim vlažnostima  $\varphi_1$



Slika 5.5 Dijagram dovedenog toplinskog toka  $Q_G$  pri različitim relativnim vlažnostima  $\varphi_1$



Slika 5.6 Dijagram izdvojene količine vodene pare  $W$  pri različitim relativnim vlažnostima  $\varphi_1$

Iz priloženih grafova se može izvesti zaključak da linearnom promjena relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$  također gotovo linearno utječe na promjenu oduzetog toplinskog toka  $Q_H$  i dovedenog toplinskog toka  $Q_G$ .

Očitavanjem iz grafova se vidi da povećanjem relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$ , uz konstantne temperature početnog stanja  $t_1$  i temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2$ , se povećava apsolutna vrijednost oduzete topline  $Q_H$ . Što ima smisla jer povećanjem relativne vlažnosti zraka, pri konstantnoj temperaturi, se povećava vrijednost specifične entalpije, tj. povećava se energijska razina vlažnog zraka. Povećanjem vrijednosti specifične entalpije početnog stanja vlažnog zraka stvara se veća razlika između specifične entalpije početnog stanja  $h_1$  i specifične entalpije stanja  $h_2$  koje ima određenu temperaturu na koju se hladi vlažni zrak. Povećanje razlike specifičnih entalpija rezultira većom apsolutnom vrijednosti odvedene topline  $Q_H$ , što se vidi i iz izraza (3.1).

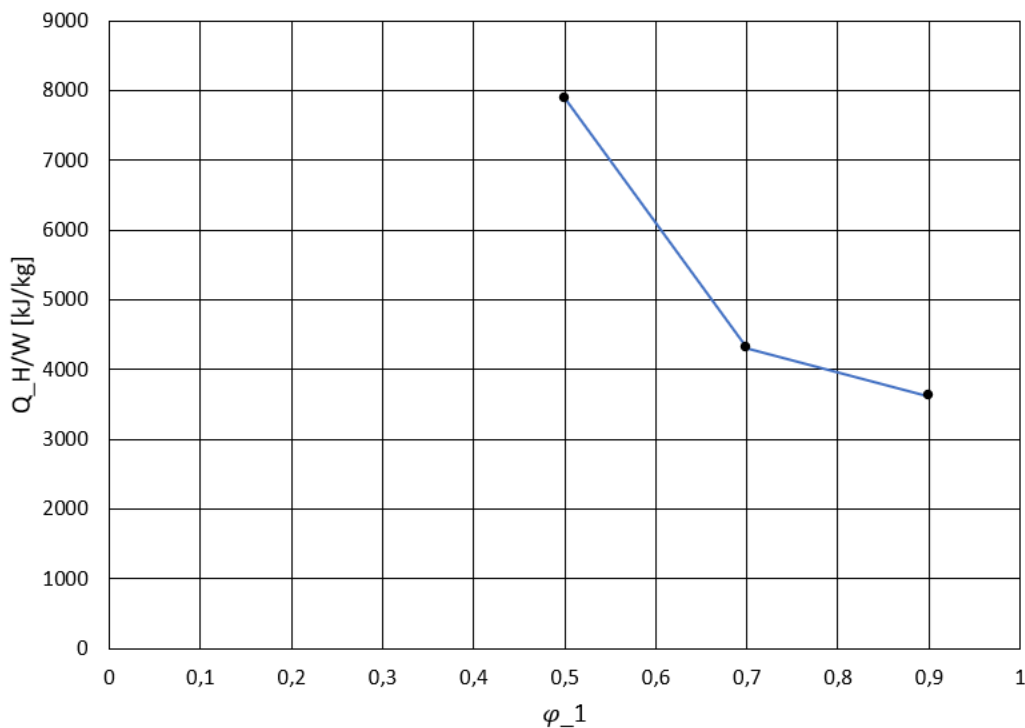
Toplina  $Q_G$  koju je potrebno predati zraku je u sva tri slučaja jednaka. Predana toplina  $Q_G$  je konstantna jer se nisu mijenjale vrijednosti temperature, te s time i vrijednosti specifičnih entalpija, u stanju 2 i konačnom stanju 3. Konstante vrijednosti specifičnih entalpija stanja 2 i 3 rezultiraju konstantnom vrijednosti predane topline  $Q_G$ , što se može vidjeti i iz izraza (3.2).

Količina vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka se također povećava sa povećanjem relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$ . Što ima smisla, jer povećanjem relativne vlažnosti zraka rezultira da se u zraku nalazi veća količina vodene pare. Tvrdnja se potvrđuje izračunavanjem razlike količine vodene pare u stanjima 1 i 3, pomoću izraza (2.1), gdje je vidljiva veća razlika sa povećanjem relativne vlažnosti zraka.

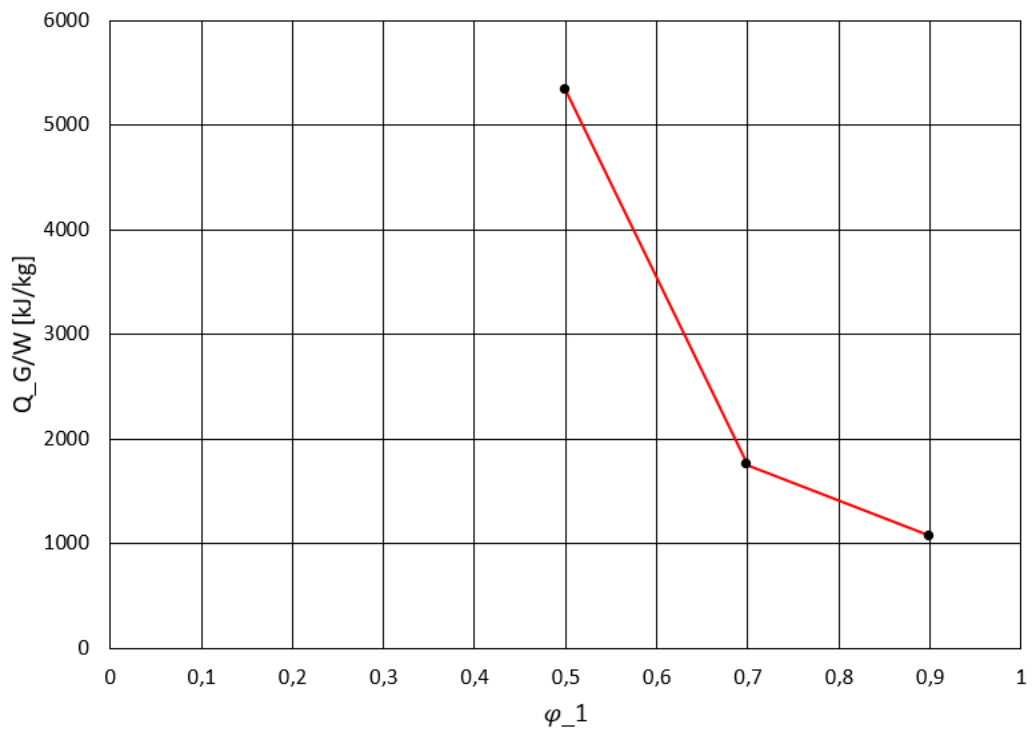
Drugi dio analize se izvodio sa promjenom relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$  uz konstantne temperature početnog stanja  $t_1$ , temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2$  i količinu suštog zraka  $Z$ . Iz dobivenih rezultata se na slici 6.3 prikazan je omjer odvedenog toplinskog toka  $Q_H$  i količine vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka, te na slici 6.4 se prikazao omjer predanog toplinskog toka  $Q_G$  i količine vodene pare  $W$  koja se izdvojila iz vlažnog zraka. Iz kojih se vidi kako povećanjem relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$  se smanjuje i apsolutna vrijednost topline po kilogramu vlažnog zraka koju je potrebno oduzeti i predati vlažnom zraku u procesu razvlaživanja.

Tablica 5.1 Podaci izdvojene količine vode te odvedene i dovedene topline za različite relativne vlažnosti  $\varphi_1$

$\varphi_1$ [%]	$W$ [kg/h]	$Q_H/W$ [kg/kJ]	$Q_G/W$ [kg/kJ]
50	0,281	7893,24	53338,08
70	0,856	4310,75	1752,34
90	1,406	3624,47	1066,85



Slika 5.7 Dijagram koji prikazuje omjer odvedenog toplinskog toka  $Q_H$  i količine vodene pare  $W$  sa promjenom relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$



Slika 5.8 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka  $Q_G$  i količine vodene pare  $W$  sa promjenom relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$



## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu se htjelo prikazati što se dešava sa procesom razvlaživanja zraka prilikom promjene određenih parametara. Sve u cilju usporedbe procesa u kojima se mijenjaju dva različita parametra uz konstantne ostale vrijednosti.

Iz priloženih dijagrama može zaključiti da je potrebno uložiti više energije za razvlaživanje po kilogramu vlažnog zraka kada je manja razlika između temperature početnog stanja  $t_1$  i temperature na koju hladimo vlažni zrak  $t_2$ . Potrebno je uložiti više energije po kilogramu vlažnog zraka za razvlaživanje kada je manja razlika između početne relativne vlažnosti zraka  $\varphi_1$  te željene vrijednosti relativne vlažnosti zraka  $\varphi_3$  na koju je potrebno razvlažiti zrak. Trebalo bi težiti što većim razlikama u temperaturama i relativnim vlažnostima kako bi se povećala efikasnost procesa, no to nije uvijek moguće. Veći zahtjevi za utrošenom energijom rezultiraju i većim troškovima, zbog čega se i rade proračuni procesa razvlaživanja zraka kako bi optimizirali svi parametri te troškove svelo na minimalne moguće.

## 7. LITERATURA

[1] Trp, A.; Lenić, K.: „XXV. predavanje“, predavanje iz kolegija „Termodinamika 1“, Rijeka, 2020.

[2] Trp, A.; Lenić, K.: „XXVI. predavanje“, predavanje iz kolegija „Termodinamika 1“, Rijeka, 2020.

[3] Galović, A.. „TERMODINAMIKA II“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[4] Halasz, B.; Galović, A.; Boras, I.: „Toplinske tablice“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

## 8. POPIS OZNAKA

$x$  – apsolutna vlažnost zraka, kg/kg

$W$  – masa vodene pare, kg/s

$Z$  – protok suštog zraka, kg/s

$\varphi$  – relativna vlažnost zraka, -

$p_d$  – parcijalni tlak vodene pare, Pa

$p_G$  - tlak zasićenja za zadanu temperaturu, Pa

$\chi$  – stupanj zasićenja, -

$h$  – specifična entalpija vlažnog zraka, J/kg

$h_d$  – specifična entalpija vodene pare, J/kg

$h_m$  – specifična entalpija smjese, J/kg

$h_z$  – specifična entalpija suštog zraka, J/kg

$c_{pd}$  – specifični toplinski kapacitet vodene pare, čija je vrijednost  $c_{pd}=1,93$  kJ/kgK

$c_{pz}$  – specifični toplinski kapacitet suštog zraka, čija je vrijednost  $c_{pz}=1,005$  kJ/kgK

$r_0$  – specifična toplina potrebna za isparavanje vode, čija je vrijednost  $r_0=2500$  kJ/kg

$Q$  – toplinski tok, W

$Q_H$  – toplinski tok koji se izmjeni pri promjeni stanja 1 u stanje 2, W

$Q_G$  – toplinski tok koji se izmjeni pri promjeni stanja 2 u stanje 3, W

$t$  – temperatura, °C

## 9. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Mollierov hx – dijagram .....	4
Slika 3.1 Mollierov hx - dijagram procesa grijanja zraka .....	5
Slika 3.2 Mollierov hx - dijagram procesa hlađenja zraka.....	6
Slika 3.3 Mollierov hx - dijagram procesa razvlaživanja zraka.....	7
Slika 3.4 Mollierov hx - dijagram procesa miješanja zračnih struja.....	9
Slika 3.5 Mollierov hx - dijagram procesa dodavanja vode vlažnom zraku .....	10
Slika 3.6 Mollierov hx - dijagram procesa dodavanja vodene pare vlažnom zraku .....	11
Slika 4.1 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa temperaturom $t_2=10^\circ\text{C}$ .....	14
Slika 4.2 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa temperaturom $t_2=15^\circ\text{C}$ .....	17
Slika 4.3 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa temperaturom $t_2=20^\circ\text{C}$ .....	21
Slika 4.4 Dijagram ovisnosti oduzetog toplinskog toka $Q_H$ o temperaturama $t_2$ .....	23
Slika 4.5 Dijagram ovisnosti dovedenog toplinskog toka $Q_G$ o temperaturama $t_2$ .....	24
Slika 4.6 Dijagram ovisnosti izdvojene količine vodene pare $W$ o različitim temperaturama $t_2$ ..	24
Slika 4.7 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka $Q_H$ i količine vodene pare $W$ sa promjenom temperature $t_2$ .....	26
Slika 4.8 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka $Q_G$ i količine vodene pare $W$ sa promjenom temperature $t_2$ .....	26
Slika 5.1 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti $\varphi_1=50\%$ .....	28
Slika 5.2 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti $\varphi_1=70\%$ .....	32
Slika 5.3 Molliereov hx-dijagram za osnovni proces sa relativnom vlažnosti $\varphi_1=90\%$ .....	35
Slika 5.4 Dijagram oduzetog toplinskog toka $Q_H$ pri različitim relativnim vlažnostima $\varphi_1$ .....	38
Slika 5.5 Dijagram dovedenog toplinskog toka $Q_G$ pri različitim relativnim vlažnostima $\varphi_1$ .....	38
Slika 5.6 Dijagram izdvojene količine vodene pare $W$ pri različitim relativnim vlažnostima $\varphi_1$	39
Slika 5.7 Dijagram koji prikazuje omjer odvedenog toplinskog toka $Q_H$ i količine vodene pare $W$ sa promjenom relativne vlažnosti zraka $\varphi_1$ .....	40
Slika 5.8 Dijagram koji prikazuje omjer predanog toplinskog toka $Q_G$ i količine vodene pare $W$ sa promjenom relativne vlažnosti zraka $\varphi_1$ .....	41

## 10. POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Podaci izdvojene količine vode te odvedene i dovedene topline za različite temperature $t_2$ .....	26
Tablica 5.1 Podaci izdvojene količine vode te odvedene i dovedene topline za različite relativne vlažnosti $\varphi_1$ .....	40

## 11. SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je proces razvlaživanja zraka. Na početku rada dan je opis pojma vlažnog zraka kao i osnovne fizikalne veličine vlažnog zraka. Također su opisane i prikazane promjene vlažnog zraka u Mollierovom  $h_x$  – dijagramu. U radu se provode dva proračuna. U jednoj analizi se prikazuje što se događa sa procesom kada se mijenja temperatura na koju se hladi vlažni zrak, dok su početna temperatura, relativna vlažnost zraka i količina suštog zraka konstantne. Dok se u drugoj analizi prikazuje što se događa sa procesom kada se mijenja početna relativna vlažnost zraka, a početna temperatura, temperaturu na koju se hladi vlažni zrak i količina suštog zraka konstantne. Na posljetku se prikazuje kako su promjene parametara utjecale na proces razvlaživanja te se navodi zaključak čemu treba težiti da bi proces bio što učinkovitiji, što u konačnici rezultira manjim troškovima energije.

Ključne riječi: proces razvlaživanja zraka, vlažni zrak

## 12. SUMMARY

The topic of this paper is the air dehumidification process. At the first part of the paper, a description of the concept of humid air is given, as well as the basic physical parameters of humid air. Changes of the state of humid air in Mollier's  $h_x$  diagram are also described and shown. Two calculations are carried out in the paper. One analysis shows what happens to the process when the temperature to which humid air is cooled is changing, while the initial temperature, relative humidity and amount of dry air are constant. While the second analysis shows what happens to the process when the initial relative humidity of the air changes, and the initial temperature, the temperature to which the humid air is cooled, and the amount of dry air are constant. At the end, it is shown how the changes in the parameters affected the dehumidification process, and the conclusion is given as to what should be aimed for in order to make the process as efficient as possible, which ultimately results in lower energy costs.

Key words: air dehumidification process, humid air