

VENTILACIJA BRODSKIH SKLADIŠNIH PROSTORA

THE VENTILATION OF CARGO SPACES

UDK 629.12.011.51:629.1.065

Stručni rad
Professional paper

Sažetak

U radu je opisan problem zaštite tereta od kvarenja i propadanja zbog kondenzacije vlage na brodskoj strukturi i na površini samog tereta. Izložena je i teorija vlažnog zraka, kako bi se lakše razumjeli uzroci zbog kojih dolazi do kondenziranja vlage. Pravilnom ventilacijom brodskih skladišnih prostora, koja se provodi po utvrđenim načelima, moguće je sigurno i pouzdano otkloniti uzroke kondenzacije vlage i tako spriječiti oštećenje tereta.

Ključne riječi: vlažni zrak, temperatura rosišta, kondenzacija vlage, ventilacija

1. UVOD

INTRODUCTION

Pod pojmom ventilacije ili provjetravanja prostorija općenito se podrazumijeva proces izmjene zraka u prostorijama, dovodenjem svježeg i odvođenjem istrošenog ili zagađenog zraka, prirodnim ili prisilnim putem, pomoću ventilatora.

Pri tome zrak se može dodatno obrađivati, za što se, u ovisnosti o potrebnom karakteru i stupnju obrade, koriste sljedeći postupci:

- a) mehaničkom obradom zraka postupkom *filtriranja* postiže se čišćenje zraka od prašine i drugih mehaničkih nečistoća;
- b) postupcima toplinsko-vlažnosne obrade *grijanjem, hlađenjem, vlaženjem i sušenjem* postižu se odgovarajuće vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka;
- c) fizičko-kemijskom obradom zraka postupcima *odoracije, dezodoracije, ionizacije, deionizacije i sterilizacije* postiže se odgovarajući fizičko-kemijski sastav zraka.

zacije postiže se odgovarajući fizičko-kemijski sastav zraka.

Ventilacijski sustav može biti izveden kao autonoman ili kao sastavni dio klimatizacijskog sustava.

Ventilacijom prostorija mogu se općenito postići sljedeći učinci:

- a) u prostorijama gdje borave ljudi, nadoknaditi manjak utrošenog kisika, smanjiti koncentraciju CO₂ te odstraniti neugodne mirise i vlagu;
- b) u sanitarnim prostorijama, odstraniti štetne plinove, neugodne mirise i vlagu;
- c) u prostorijama gdje se razvijaju eksplozivni ili otrovni plinovi i pare, povećanom izmjenom zraka koncentraciju tih plinova ili para održavati nižom od donje granice opasne koncentracije;
- d) u prostorijama s povišenom temperaturom, dovođenjem zraka niže temperature, koji će prostrujavati prostorijom i zagrijavati se, odvesti stanovitu količinu topline iz prostorije;
- e) u prostorijama iz kojih se želi odstraniti vlaga, prostrujavanjem dovedenog zraka prostorijom, koji će se miješati s unutrašnjim vlažnim zrakom i dovlažiti, sniziti sadržaj vlage u prostoriji i otkloniti opasnost kondenzacije;
- f) smanjiti koncentraciju lebdeće prašine u zraku.

Ventilacija brodskih skladišnih prostora provodi se radi ostvarenja učinaka spomenutih pod točkama (c), (d) i (e), od čega je u ovom članku detaljnije obrađen problem zaštite tereta od kvarenja i propadanja zbog kondenzacije vlage, (e). Naime, tereti koji se prevoze morem na dugim relacijama obično prolaze različitim klimatskim zonama, pa su zbog toga izvrgnuti velikim promjenama temperature i vlažnosti atmosferskog zraka, temperature mora i općih klimatskih uvjeta. Stoga su brodski tereti prvenstveno podložni oštećenju

* Matko Bupić, dipl. ing.
Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik

od kondenzacije vlage, a neke vrste tereta i od razvijenih opasnih i upaljivih plinova, pljesnivih mirisa i topline. Zapovjednik broda obavezan je, bez obzira na duljinu trajanja putovanja, naručitelju isporučiti teret u ispravnom stanju. Iz toga razloga potrebno je za vrijeme plovidbe neprekidno nadzirati teret, te poznavajući uzroke zbog kojih dolazi do kondenzacije vlage, pravilnom primjenom sustava ventilacije brodskog skladišnog prostora spriječiti spomenutu pojavu i na taj način osigurati zaštitu brodskog tereta od kvarenja i oštećenja.

Svrha ovog rada je doprinijeti poboljšanju ventilacije brodskih skladišnih prostora, a time smanjivanju učestalosti pojava kvarenja tereta, do kojih dolazi zbog nepravilnog reguliranja vlažnosti u brodskim skladištima. Stoga je posebno poglavlje posvećeno teoriji vlažnog zraka, jer se samo jasnim razumijevanjem uzroka mogu poduzeti odgovarajuće mjere i izbjeći štetne posljedice kondenzacije vlage u brodskim skladištima tereta.

2. Vrste tereta i vrste oštećenja

Types of Cargo and Types of Damage

Poglaviti je razlog ventilacije brodskih skladišnih prostora, kako je rečeno u uvodu, spriječiti štetu od kondenzacije vlage, kako na brodskoj strukturi, tako na površini samog tereta. Iz toga gledišta tereti se mogu podijeliti u dvije skupine: higroskopne i ne-higroskopne.

Higroskopni tereti (*Hygroscopic Cargoes*)

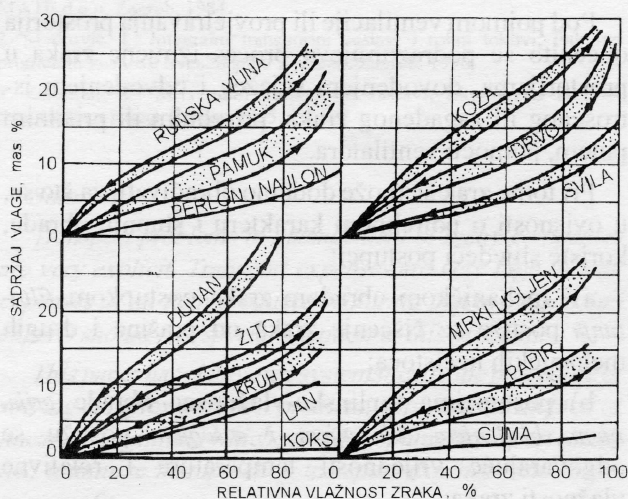
Higroskopnost je svojstvo određenih krutih ili tekućih tvari (organskih i anorganskih spojeva) da iz svoga okoliša, npr. zraka, oduzimaju vlagu. Naročito su higroskopni: sulfatna kiselina, glicerol, kalcijev klorid, silikagel, a od uobičajenih brodskih tereta: žitarice, brašno, pamuk, duhan, drvena građa. Ovi materijali obično sadrže izvjesnu količinu adsorbirane vlage, koja se ponaša kao slobodna površina vode i nije kemijski, ili na neki drugi način, čvršće vezana za materijal. Sadržaj vlage u materijalu ovisi o njegovom prethodnom tretmanu okolišnim zrakom i može varirati u širokom opsegu, slika 1. Ako je, naime, materijal dovoljno dugo u dodiru s okolišnim zrakom, on će adsorbirati (upijati) vlagu iz zraka ili desorbirati (odavati) vlagu zraku, sve dok se ne postigne ravnoteža između parcijalnog tlaka vodene pare u zraku i tlaka vodene pare u materijalu, tj. dok im se ne izjednače temperature rosišta. Ovaj tip tereta može, dakle, za vrijeme putovanja u jednom periodu odavati vlagu, a u drugom je upijati, ovisno o vrijednosti temperature rosišta okolišnog zraka u skladištu, zbog čega mu se može značajno promijeniti težina. Nije neobično da skladišta od 2500 do 3000 m³ nakrcana duhanom upiju, ili odaju, ventilacijskom zraku i do 250 litara

vode na dan. Ovu vrijednost, koju je moguće točno izračunati znajući podatke o temperaturi rosišta zraka na ulazu i na izlazu iz skladišta, kao i količinu ventilacijskog zraka, potrebno je oduzeti, ili dodati, težini tereta.

Higroskopni teret s ovakvim svojstvima ima stalni utjecaj na temperaturu rosišta zraka u skladištu, adsorbirajući vlagu kad temperatura rosišta raste i odavajući vlagu kad temperatura rosišta pada, što može imati za posljedicu *KONDENZACIJU VLAGE NA BRODSKOJ STRUKTURI*, obično zvano "znojenje" (engl. ship sweat). Proces započinje ukrcajem tereta u nekoj tropskoj ili subtropskoj luci, gdje je zrak vruć i vlažan. Teret adsorbira veliku količinu vlage iz zraka. Za vrijeme putovanja, koje može potrajati više tjedana i voditi kroz tropska područja, teret postaje još topliji zagrijavan Sunčevim zračenjem i toplinom iz strojnice koja prolazi kroz čelične pregrade, što ima za posljedicu isparavanje dijela vlage iz tereta u okolišni zrak. Time se povećavaju i apsolutna vlažnost i temperatura rosišta okolišnog zraka. Dolaskom hladnijeg vremena, čelična brodska konstrukcija u dodiru s hladnim zrakom, kišom, snijegom i samim morem, ohladi se na temperaturu nižu od temperature rosišta zraka u skladištu. Na tako ohlađenim površinama, prvenstveno stropu i bočnim stranama, dolazi do kondenzacije vlage iz zraka. Razmjeri ove pojave mogu se shvatiti ako se zna da temperatura atmosferskog zraka, u određenim uvjetima plovidbe, može pasti za više od 25°C u jednom danu.

Higroskopni tereti, s obzirom na sklonost oštećenju od kondenzirane vlage, mogu se podijeliti u tri grupe:

a) pamuk, vuna, celuloza, zelena drvena građa, juta, pluto i vlažna rudača nisu podložni kvarenju zbog kondenzacije vlage;



Slika 1. Sadržaj vlage u stanju ravnoteže za različite materijale pri 20 do 30°C. Krivulje adsorpcije i desorpcije.

Figure 1. The humidity contents in the state of balance for different materials at 20 to 30°C. The adsorption and desorption curves.

b) rasuti tereti poput sjemenja, riže, nezrelih žitarica, graha i boba ovlaživanjem počinju se samozagrijavati i truliti te zaudarati, što osim štete na njima samima, može uzrokovati i kvarenje drugog tereta smještenog u istom skladišnom prostoru;

c) posebnu grupu čine tereti kao duhan, čaj, kava, šećer, mirodije, brašno, suhe kože i krzna koji su podložni oštećenju od kapljica vlage kondenzirane na stropu skladišta koje kaplju po teretu.

Nehigroskopni tereti (*Non-Hygroscopic Cargoes*)

Tereti poput čeličnih i pocinčanih limova i cijevi, stojeva, instrumenata, limenki i uopće konzervirane robe ne sadrže u sebi nimalo vlage, osim one kojom može biti ovlažena njihova površina ako je, prije ukrcaja, bila izložena kiši. Najveću opasnost za teret ove vrste predstavlja ventilacija vrućim zrakom prethodno ohlađenog tereta, što za posljedicu ima *KONDENZACIJU VLAGE NA POVRŠINI SAMOG TERETA* (engl. cargo sweat). Ovaj proces započinje ukrcajem metalnih proizvoda u nekoj sjevernoj luci, koji su prethodno bili dovoljno dugo izloženi hladnom atmosferskom zraku i na taj način rashlađeni na nisku temperaturu. Složen u skladište ovakav će teret, zbog velike mase, vrlo sporo mijenjati temperaturu, znatno kasneći za promjenama atmosferske temperature. Porast temperature tereta može biti manji od 1°C na dan pri povećanju atmosferske temperature i do 20°C u istom periodu, tako da za izjednačavanje temperature tereta s atmosferskom temperaturom zraka ili temperaturom mora ponekad treba proteći i više od tri tjedna. Istovremeno, dolaskom toplijeg vremena vlaga isparava iz eventualno prisutnog higroskopskog tereta, kao i iz drva od kojeg su izrađene ambalažne kutije i sanduci, iz razdjelnih dasaka i iz kartonske ambalaže, podižući tako temperaturu rosišta okolišnog zraka iznad temperature metalnih proizvoda. Neminovna



Slika 2. Konzervirana roba oštećena kondenziranom vlagom.

Figure 2. Canned food damaged by condensed humidity.

posljedica je kondenziranje vlage na hladnim površinama tereta. Još nepovoljnije stanje po teret nastupit će u slučaju ventiliranja skladišta vlažnim tropskim zrakom.

Tereti ove vrste podložni su oštećenju zbog kondenzacije vlage na njima, koje se ogleda u hrđanju, mrljanju i blijeđenju boje. U slučaju konzervirane robe, rezultat će biti naborane etikete i kartonske kutije te zahrđale limenke, koje, iako neoštećenog sadržaja, neće biti prikladne za prodaju, slika 2.

Ostali tereti (*Other Cargoes*)

Pored spomenutih vrsta tereta, postoje tereti koje također treba ventilirati, kako bi se iz skladišnih prostora uklonili razvijeni eksplozivni ili otrovni plinovi, kao i toplina razvijena u samom teretu, te na taj način teret zaštitio od oštećenja.

Ugljen, koji se prevozi u rasutom stanju specijalnim brodovima za ugljen ili brodovima za opći teret, teret je koji zahtijeva specifičan režim ventiliranja. Ugljen je, naime, sklon samozapaljenju (kritična temperatura 60 do 70°C), jer dobro adsorbira kisik iz okolišnog zraka, pri čemu se odvija kemijski proces uz oslobađanje topline. Također je sklon eksploziji, jer neposredno nakon ukrcaja u skladište počinje razvijati eksplozivni plin metan (močvarni plin), koji sa zrakom, ako ga u njemu ima 5 do 14%, tvori eksplozivnu smjesu. Pravilna ventilacija skladišta, kojoj je svrha zaštita ugljena od samozapaljenja ili eksplozije, sastoji se od intenzivne površinske ventilacije za vrijeme prvih pet dana nakon ukrcaja, kako bi se osigurao odvod razvijenog metana i oslobođene topline, što se skupljaju u gornjim, višim slojevima skladišnog prostora, a kasnije se, uz potpuno zatvoreno skladište, površinska ventilacija provodi povremeno (prema nekim pravilima svaki drugi dan po 6 sati). Ventilacija u masi ugljena strogo je zabranjena, jer bi samo pospješila samozagrijavanje. Pravilno slaganje ugljena nužna je pretpostavka uspješne zaštite od oštećenja ove vrste tereta.

Pri prijevozu tekućih tereta također se provodi ventilacija skladišnih prostora - tankova, i to za vrijeme dok su puni, ali i kada su prazni. Kada su tankovi puni ventilacijom se odvođe zapaljivi ili eksplozivni plinovi nastali isparavanjem dotičnog tekućeg tereta (sirove nafte, naftnih derivata, kemikalija). Prazni tankovi ventiliraju se prije nego što u njih uđu ljudi radi čišćenja ili obavljanja popravaka, kao i zbog zaštite brodske konstrukcije od korozije.

Ipak je, kao što se vidi, najčešća svrha ventilacije brodskih skladišnih prostora otkloniti opasnost od kondenzacije vlage. Da bi se ta zadaća ventilacijom uspješno obavila, neophodno je poznavanje teorije vlažnog zraka.

3. Vlažni zrak

Humid Air

Zrak je mješavina plinova koji zadržavaju svoje relativne proporcije u mješavini u širokom opsegu temperatura (78.03 vol.% N₂, 20.93 vol.% O₂, itd.). Stoga se suhi zrak, mada sam po sebi nije jedinstvena tvar, može tretirati kao poseban plin, štoviše kao idealni plin.

U prirodi i inženjerskoj praksi zrak nikada nije potpuno suh, nego, zavisno od raznih okolnosti sadrži veću ili manju količinu vlage (vodene pare). Taj udio pare najčešće je vrlo malen, tako da joj parcijalni tlak u zraku dostiže svega nekoliko stotina paskala [1 Pa = 1 N/m²], a budući da joj je temperatura jednaka temperaturi zraka, to je vlaga u zraku zapravo pregrijana para. Kao takva, para se ponaša poput idealnog plina, pa je vlažni zrak, zapravo, smjesa dva idealna plina: suhog zraka i vodene pare.

S obzirom na već spomenuti promjenljivi udio vodene pare u zraku, uobičajeno je da se količina vlažnog zraka iskazuje kao:

1 kg suhog zraka + x kg vlage, tj. $1 + x$ kg vlažnog zraka, gdje je *apsolutna vlažnost*

$$x = \frac{W}{Z} \text{ [kg vlage / kg suhog zraka].} \quad (1)$$

Ista veličina može se izraziti i preko parcijalnih tlakova pare (P_p) i suhog zraka ($P - P_p$), gdje je P ukupni tlak vlažnog zraka:

$$x = 0.622 \frac{P_p}{P - P_p}. \quad (2)$$

Ovaj izraz vrijedi uz pretpostavku da se vlaga u smjesi sa suhim zrakom nalazi u parovitom stanju. Naime, ovdje je važno upozoriti na još jedno važno svojstvo vlažnog zraka povezano s količinom vlage koju on može primiti. Suhi zrak određene temperature može primiti toliko vodene pare dok njezin parcijalni tlak u njemu ne postane jednak tlaku zasićenja vodene pare za istu temperaturu. Ako bi se tako zasićenom vlažnom zraku dodavalo još pare, ona bi se odmah kondenzirala i ostala lebdjeti u zraku u obliku sitnih kapljica (magla). Prema tome je najveća postižljiva vlažnost u parovitom obliku ovisna, osim o ukupnom tlaku P , još i o temperaturi zraka t i može se izraziti kao:

$$x_z = 0.622 \frac{P_z}{P - P_z}, \quad (3)$$

gdje je P_z tlak zasićenja pare za danu temperaturu t (iz parnih tablica).

Pored apsolutne vlažnosti, često se koristi *relativna vlažnost*:

$$\varphi = \frac{P_p}{P_z}, \quad (4)$$

kao i *stupanj zasićenja*:

$$\chi = \frac{x_p}{x_z}. \quad (5)$$

Za niže temperature vlažnog zraka vrijedi:

$$\varphi \cong \chi \quad (6)$$

Pri ovom načinu izražavanja količine vlage u zraku, vrijednosti za vlažnost kreću se od $\varphi = 0$ za suhi zrak, do $\varphi = 1$ za potpuno zasićeni zrak, ali bez viška vlage, tj. magle.

Mollierov h - x dijagram (*Mollier h - x Chart*)

Za definiranje stanja vlažnog zraka kao i za praćenje procesa s vlažnim zrakom, najčešće se koristi Mollierov h - x dijagram vlažnog zraka, slika 3.

Entalpija (ukupna energija, oznaka: h) vlažnog zraka, kao smjese idealnih plinova suhog zraka i vodene pare, za slučaj kada se vlaga nalazi samo u parovitom obliku (nezasićeni vlažni zrak) iznosi:

$$h = c_{p,z} \cdot t + x \cdot (r_0 + c_{p,p} \cdot t) \text{ [kJ/kg]}, \quad (7)$$

gdje prvi član predstavlja entalpiju 1 kg suhog zraka, kojemu je specifična toplina $c_{p,z} = 1.005$ [kJ/kg°C], a drugi član entalpiju x kg pare koja se nalazi u zraku, kojoj je specifična toplina $c_{p,p} = 1.930$ [kJ/kg°C] i toplina isparavanja kod 0°C $r_0 = 2500$ [kJ/kg]. Ovdje je nultočka entalpije, $h = 0$ [kJ/kg], uzeta kod 0°C.

Ako je vlažni zrak, pri danoj temperaturi, potpuno zasićen vodenom parom ($x = x_z$), njegova entalpija biti će:

$$h = c_{p,z} \cdot t + x_z \cdot (r_0 + c_{p,p} \cdot t). \quad (8)$$

Entalpija prezasićenog (zamagljenog) vlažnog zraka, koji osim maksimalne količine vodene pare za danu temperaturu sadrži još i kapljice vode i čestice leda, biti će:

$$h = c_{p,z} \cdot t + x_z (r_0 + c_{p,p} \cdot t) + x_w \cdot c_w \cdot t - x_l \cdot (r_l - c_l \cdot t), \quad (9)$$

gdje treći član predstavlja entalpiju x_w kg vode, kojoj je specifična toplina $c_w = 4.18$ [kJ/kg°C], a četvrti član entalpiju x_l kg leda, kojemu je toplina smrzavanja kod 0°C $r_l = 334$ [kJ/kg], specifična toplina $c_l = 2.09$ [kJ/kg°C] i temperatura minus (-) t .

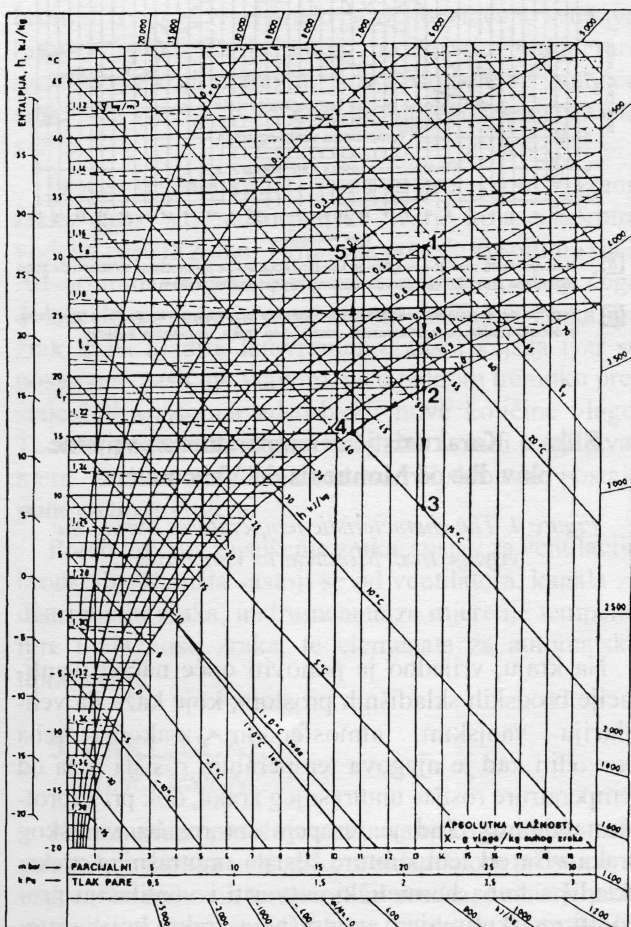
U jednadžbi (9) treći i četvrti član mogu egzistirati istovremeno samo kada je temperatura vlažnog zraka 0°C, jer tada u njemu mogu biti istodobno i kapljice vode i čestice leda. Za više temperature zrak može sadržavati samo paru i vodu, a za niže temperature samo paru i led.

Na temelju izraza (7), (8) i (9) konstruiran je spomenuti dijagram, tako da je za svaku temperaturu ucrtana po jedna linija izoterma ($t = \text{konst.}$), koja predočuje svezu entalpije h i apsolutne vlažnosti x . Nagib tih linija određen je vrijednošću $(\partial h/\partial x)_t$, koristeći za nezasićeno područje jednadžbu (7), a za zasićeno područje jednadžbu (9). Granična linija, linija zasićenja ili linija rošenja ($\phi = 1$), koja dijeli područje dijagrama na nezasićeno i zasićeno, dobijena je spajanjem točaka čije su koordinate granične vrijednosti x_z i h_z , izračunate prema izrazima (3) i (8) za svaku temperaturu. Linija zasićenja pri $x \rightarrow \infty$ asimptotski teži onoj izotermi nezasićenog područja koja pripada temperaturi vrenja vode za ukupni tlak vlažnog zraka P za koji je dijagram konstruiran ($P = 1.013 \text{ bar} \leftrightarrow t_z = 100^\circ\text{C}$).

cisa x , a time i linije $h = \text{konst}$, nagnuta pod kutom $\text{tg } \alpha = r_0 \cdot x$, čime je izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ nezasićenog područja dovedena u horizontalni položaj.

Temperatura rosišta (Dewpoint Temperature)

Hlađenjem vlažnog zraka stanja 1 ($t = 30^\circ\text{C}$, $\phi = 0.5$), slika 3, snizuje mu se temperatura i entalpija, relativna vlažnost mu raste, a apsolutna vlažnost se ne mijenja. U jednom trenutku, stanje 2 ($t = 18.5^\circ\text{C}$, $\phi = 1.0$), zrak je potpuno zasićen parom i u njemu se počinju pojavljivati prve kapljice magle. Temperatura kod koje se to događa naziva se *temperatura rosišta* ili *temperatura kondenzacije* (engl. dewpoint temperature), tablica 1. Daljnjim hlađenjem do stanja 3 ($t = 15^\circ\text{C}$) u zraku je sve više magle, odnosno kapljica vode. Apsolutna vlažnost jednaka je početnoj ($x_3 = x_2 = x_1$), ali je od toga količina x_4 kg u parnom stanju, a količina $x_3 - x_4$ kg u obliku kapljica.



Slika 3. h - x dijagram vlažnog zraka pri tlaku $P = 1.103 \text{ bar}$

Figure 3. h - x chart of humid air at pressure $P = 1.013 \text{ bar}$

Potrebno je još napomenuti da je h - x dijagram vlažnog zraka, slika 3, iz praktičnih razloga nacrtan u kosokutnom koordinatnom sustavu, tako da je os ap-

Tablica 1. Temperature rosišta zraka

Table 1. Dewpoint temperatures

Temperatura zraka [°C]	Temperature rosišta [°C] pri različitim relativnim vlažnostima										
	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
-10	-17.6	-16.6	-15.7	-14.7	-13.9	-13.2	-12.5	-11.8	-11.2	-10.5	-10.0
-5	-12.9	-11.8	-10.8	-9.9	-9.1	-8.3	-7.6	-6.9	-6.2	-5.6	-5.0
0	-8.1	-6.6	-5.6	-4.7	-3.8	-3.1	-2.3	-1.6	-0.9	-0.3	0.0
+2	-5.5	-5.3	-4.3	-3.4	-2.5	-1.6	0.8	-0.1	+0.6	+1.3	+2.0
+4	-4.8	-3.7	-2.7	-1.8	-0.9	-0.1	+0.8	+1.6	+2.4	+3.2	+4.0
+6	-3.2	-2.1	-1.0	0.1	+0.9	+1.9	+2.8	+3.6	+4.4	+5.2	+6.0
+8	-1.6	-0.4	+0.7	+1.8	+2.9	+3.9	+4.8	+5.6	+6.4	+7.2	+8.0
+10	+0.1	+1.4	+2.6	+3.7	+4.8	+5.8	+6.7	+7.6	+8.4	+9.2	+10.0
+12	+1.9	+3.2	+4.3	+5.5	+6.6	+7.6	+8.5	+9.5	+10.3	+11.2	+12.0
+14	+3.8	+5.1	+6.4	+7.5	+8.6	+9.6	+10.5	+11.5	+12.4	+13.2	+14.0
+16	+5.6	+7.0	+8.2	+9.4	+10.5	+11.5	+12.5	+13.4	+14.3	+15.2	+16.0
+18	+7.4	+8.8	+10.1	+11.3	+12.4	+13.5	+14.5	+15.4	+16.3	+17.2	+18.0
+20	+9.3	+10.7	+12.0	+13.2	+14.3	+15.4	+16.5	+17.4	+18.3	+19.2	+20.0
+22	+11.1	+12.5	+13.9	+15.2	+16.3	+17.4	+18.4	+19.4	+20.3	+21.2	+22.0
+25	+13.8	+15.3	+16.7	+17.9	+19.1	+20.2	+21.3	+22.3	+23.2	+24.1	+25.0
+30	+18.5	+19.9	+21.2	+22.8	+24.2	+25.3	+26.4	+27.5	+28.5	+29.2	+30.0
+35	+23.0	+24.5	+26.0	+27.4	+28.7	+29.9	+31.0	+32.6	+33.1	+34.1	+35.0
+40	+27.6	+29.2	+30.7	+32.1	+33.5	+34.7	+35.9	+37.0	+38.0	+39.0	+40.0

Osim opisanog procesa 1-2-3, proces hlađenja vlažnog zraka može teći po liniji 1-2-4, i doći tako do iste krajnje temperature $t = 15^\circ\text{C}$. Takav način hlađenja vlažnog zraka ostvaruje se kad su prisutne hladne površine na koje se izlučuje suvišna vlaga (rosa), ili kad se proces hlađenja vodi jako sporo tako da se kapljice magle mogu istaložiti iz zamagljenog zraka. Na taj način dobija se zrak koji je u apsolutnom smislu suši od početnog, naravno uz odstranjivanje $x_2 = x_4$ kg istaložene vode.

Grijanjem vlažnog zraka od stanja 4 do stanja 5, raste njegova temperatura i entalpija, relativna vlažnost mu se smanjuje, a apsolutna vlažnost se ne mijenja.

Temperatura rosišta zraka najvažniji je parametar za donošenje razborite odluke u pogledu provjetravanja tereta na brodu.

4. Načela ventilacije brodskih skladišnih prostora

The Principles of Cargo Spaces Ventilation

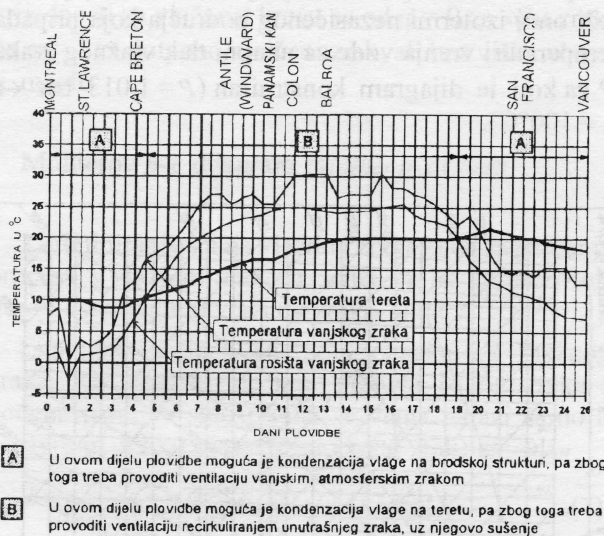
U skladišnom prostoru može istovremeno biti i higroskopni i nehigroskopni teret, što je korisno ako higroskopni teret ima relativno nizak sadržaj vlage, koji odgovara niskoj vlažnosti zraka u skladištu. Učinak ovog jest održavanje niske vrijednosti temperature rosišta zraka u skladišnom prostoru, što predstavlja sigurnost da neće doći do kondenzacije vlage, kako na brodskoj strukturi, tako ni na samom nehigroskopnom teretu. Visoki pak sadržaj vlage u higroskopnom teretu uzrokovao bi povećavanje vrijednosti temperature rosišta zraka u skladištu. Time bi se povećavala i opasnost od kondenzacije vlage, kao posljedica prisustva higroskopnog tereta.

Na temelju dosad iznesenog može se zaključiti da do kondenzacije vlage na brodskoj strukturi dolazi kad temperatura rosišta zraka u skladištu nadvisi temperaturu paluba i bokova broda, neovisno o podrijetlu vlage koja podiže vrijednost temperature rosišta. Prolaskom ventilacijskog zraka, odgovarajuće količine i kvalitete, kroz brodsko skladište, obara se visoka vrijednost temperature rosišta unutrašnjeg zraka i tako sprečava kondenziranje vlage na brodskoj strukturi. Pod odgovarajućom kvalitetom ventilacijskog zraka podrazumijeva se da je njegova temperatura rosišta niža od temperature rosišta zraka u skladištu. Ako vanjski, atmosferski zrak ima takva svojstva, onda se on i koristi za ventiliranje skladišta. U protivnom, ventiliranje skladišta vanjskim zrakom, koji bi imao temperaturu rosišta višu od temperature rosišta zraka u skladištu, intenziviralo bi kondenzaciju vlage u skladištu. Stoga u takvom slučaju treba hermetički zatvoriti skladište, a ventilaciju provoditi recirkuliranjem unutrašnjeg zraka, uz njegovo obvezatno sušenje. Odgovarajuća ventilacija je, dakle, glavni faktor u sprečavanju kondenzacije vlage na brodskoj strukturi, koja se obično javlja pri plovidbi iz toplih u hladne klimatske zone, ili pri naglim atmosferskim promjenama temperature.

Kako se opasnost od kondenzacije vlage na brodskoj strukturi javlja pri plovidbi iz toplih u hladne krajeve, jednako tako opasnost od kondenzacije vlage na teretu javlja se pri plovidbi iz hladnih u tople klimatske zone. S obzirom da je u takvim uvjetima izvor vlage koja se kondenzira na hladnim površinama tereta općenito vanjski atmosferski zrak, preventiva uključuje prekid ventilacije vanjskim zrakom, uz hermetičko zatvaranje skladišta. Pored toga, da bi se uklonila vlaga koja isparava iz eventualno prisutnog higroskopnog tereta, kao i iz razdjelnih dasaka i ambalažnih sanduka, potrebno je provoditi ventilaciju skladišta recirkuliranjem unutrašnjeg zraka, uz njegovo obvezatno sušenje. Na taj način moguće je temperaturu rosišta zraka održavati nižom od temperature

tereta. Recirkulacijom zraka kroz prostor brodskog skladišta također se intenzivira izmjena topline između hladnog tereta i tople brodske strukture i tako ubrzava izjednačavanje njihovih temperatura, smanjujući i na taj način opasnost od kondenzacije vlage na teretu.

Kao ilustracija prethodno iznesenog može poslužiti dijagramski prikaz promjena karakterističnih temperatura tijekom jedne plovidbe od Montreala ($45^{\circ}30' N$; $73^{\circ}33' W$) do Vancouvera ($49^{\circ}45' N$; $126^{\circ}00' W$), slika 4.



Slika 4. Karakteristične temperature za vrijeme plovidbe od Montreala do Vancouvera.

Figure 4. The characteristic temperatures during the voyage from Montreal to Vancouver.

Na kraju, vrijedno je ponoviti opće načelo ventilacije brodskih skladišnih prostora, koje kaže da ventilaciju vanjskim, atmosferskim zrakom treba provoditi kad je njegova temperatura rosišta niža od temperature rosišta unutrašnjeg zraka, dok pri suprotnim uvjetima, kad je temperatura rosišta vanjskog zraka viša od temperature rosišta unutrašnjeg zraka, skladišta treba hermetički zatvoriti i ventilaciju provoditi recirkuliranjem unutrašnjeg zraka, koji je prethodno bio podvrgnut procesu sušenja. Štoviše, da bi vanjski zrak bio upotrebljen za ventilaciju, poželjno je da pokazuje jasan deficit vlage, tj. da mu je temperatura rosišta znatno niža od njegove temperature. Što je spomenuta temperaturna razlika viša, to je veći adsorpcijski kapacitet takvog zraka.

Proces sušenja ili odvlaživanja zraka ima za cilj smanjiti apsolutnu vlažnost zraka. Pri tome nije nužno cjelokupnu količinu ventilacijskog zraka provoditi kroz uređaj za sušenje, već samo jedan njegov dio. Postoje različite izvedbe uređaja za sušenje zraka, ali

se prema načelima rada svi mogu podijeliti u dvije grupe:

- uređaji za sušenje zraka hlađenjem
npr. *Drihold* uređaj (Thermostat);
- uređaji za sušenje zraka pomoću adsorpcijskih tvari, npr. *Cargocaire*, *Kathabar* i *Munters* uređaj.

Uređaji za sušenja zraka hlađenjem hlade zrak na temperaturu nižu od temperature njegovog rosišta, zbog čega dolazi do kondenzacije vlage na hladnim površinama izmjenjivača topline. Tako izlučena vlaga odvodi se drenažnim sustavom. Sam proces hlađenja može biti direktni, koji koristi neku od uobičajenih rashladnih tvari (R22, R12), ili indirektni, koji za hlađenje zraka koristi rasolinu.

Uređaji za sušenje zraka pomoću adsorpcijskih tvari koriste različite adsorpcijske tvari, kao što su: silikagel, aluminijski oksid, kalcijev klorid, litijev klorid, litijev bromid. Sve ove tvari imaju naročito izraženo svojstvo higroskopnosti. Za ilustraciju može poslužiti dijagram na slici 5, koji prikazuje adsorpciju vlage pomoću silikagela (SiO_2), tvari koja se najčešće koristi za tu svrhu.

Proces sušenja zraka odvija se prolaskom vlažnog zraka kroz sloj adsorpcijske tvari, koja adsorbira vodenu paru iz zraka. Time zrak postaje apsolutno suši. Adsorbirana vodena para se kondenzira, zbog čega dolazi do povećanja temperature osušenog zraka, pa zrak treba hladiti. Istovremeno, adsorpcijska tvar se postepeno zasićuje vlagom, pa u jednom trenutku prestaje biti sposobna adsorbirati nove količine vlage. Tada se podvrgava regeneraciji, što se čini zagrijavanjem. Nakon ohlađivanja adsorpcijska tvar postaje ponovo upotreblijiva.

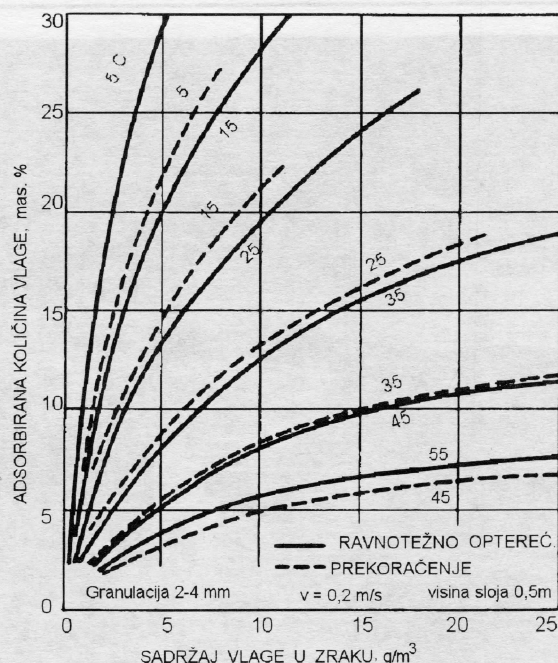
Pored uređaja za sušenje zraka, sustav za ventilaciju brodskih skladišta sastoji se od ventilatora, kanala za distribuciju zraka, instrumenata za mjerenje temperature i vlažnosti zraka, te elemenata za automatsko upravljanje.

5. ZAKLJUČAK

CONCLUSION

Kontinuirano praćenje stanja vanjskog zraka i stanja unutrašnjeg zraka u brodskom skladišnom prostoru, te usporedba njihovih temperatura rosišta, nužna je pretpostavka za donošenje ispravne odluke da li ventilaciju skladišta provoditi vanjskim zrakom ili skladište hermetički zatvoriti i ventilaciju provoditi recirkuliranjem unutrašnjeg zraka, uz njegovo sušenje. Svrha i jednog i drugog postupka jest sniziti apsolutnu vlažnost, a time i vrijednost temperature rosišta zraka u skladištu i tako otkloniti mogućnost kondenziranja vlage prisutne u zraku.

Mada je automatskim upravljanjem znatno olakšana primjena ventilacijskog sustava, ovim se radom htjelo



Slika 5. Adsorpcija vlage pomoću silikagela.

Figure 5. The adsorption by means of silica gel.

objasniti uzroke nastanka i načine sprečavanja učestale pojave kondenziranja vlage, kako na brodskoj strukturi tako i na površini samog tereta.

LITERATURA

LITERATURE

- [1.] Fran Bošnjaković, NAUKA O TOPLINI II., Tehnička knjiga, Zagreb 1976.
- [2.] Orest Fabris, OSNOVE INŽENJERSKE TERMODINAMIKE, Pomorski fakultet, Dubrovnik 1994.
- [3.] Hermann Recknagel, Eberhard Sprenger, TASCHENBUCH FÜR HEIZUNG UND KLIMATECHNIK, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München 1983.
- [4.] Earl S. Shulters, MARINE AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION, Cornell Maritime Press, Cambridge, Maryland 1981.
- [5.] ***, MARINE AIR CONDITIONING, HEATING AND VENTILATION, Thermostat Limited, Glasgow
- [6.] Marijan Šivak, CENTRALNO GRIJANJE, VENTILACIJA, KLIMATIZACIJA, Savez energetičara Hrvatske, Zagreb 1980.

Summary

The protection of cargo from deteriorating as a result of humidity condensation on the ship's structure and on the cargo surface has been described in this paper. The theory of humid air has also been presented in order to understand easier the causes of humidity condensation. It is possible to eliminate the causes of humidity condensation safely and reliably and thus prevent the cargo damages with correct ventilation of holds, which is carried out according to fixed principles.

Key words: humid air, dewpoint temperature, condensation, ventilation