

# OTAPANJE AMONIJAČNIH ISPARIVAČA METODOM POTPUNE KONDENZACIJE TOPLOG GASA

## DEFROST OF NH<sub>3</sub> EVAPORATORS BY THE METHOD OF COMPLETE CONDENSATION OF HOT GAS

Vladimir BELJANSKI<sup>1\*</sup>, Mark SEVER<sup>2</sup>, Uroš MILOVANČEVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Danfoss d.o.o., Tehnila Hlađenja, Begrade, Srbija

<sup>2</sup> Danfoss d.o.o., Tehnila Hlađenja, Zagreb, Hrvatska,

<sup>3</sup> Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija

Prilikom rada hladnjaka vazduha – isparivača na temperaturama nižim od 0°C dolazi do stvaranja leda na njegovoj površini što smanjuje njegovu efikasnost. U industrijskim amonijačnim postrojenjima čest je slučaj da se pregrejana para sa potisa kompresora koristi kao medijum za otapanje (zbog česte upotrebe izraza topli gas u praksi i njegove jednostavnosti, u nastavku će se koristiti taj termin). U radu je opisan nov pristup otapanja toplim gasom gde se koristi njegova celokupna toplota promene faze tokom trajanja procesa otapanja. Na taj način dolazi do uštede energije, direktnim smanjenjem potrošnje toplog gasa (manja količina gasa se vraća na usis kompresora,) kao i skraćena vremena otapanja. Polazna tačka pri analizi uštede energije je često primenjivani način otapanja amonijačnih isparivača toplim gasom, kontrolisanog pomoću ventila konstantnog pritiska (pritisno kontrolisano otapanje). Ovaj princip otapanja je da se proces kontroliše preko pritiska koji vlada u isparivaču tokom otapanja, što ne dovodi do potpune kondenzacije toplog gasa. U početku otapanja celokupan protok toplog gasa će se kondenzovati, ali kako proces teče sve će se manja količina kondenzovati, i pred kraj imamo situaciju da je najveći deo protoka čini topli gas (tj. vlažna para, velikog stepena suvoće) koji bespotrebno opterećuje kompresor. Kod otapanja sa potpunom kondenzacijom, proces se ne kontroliše preko pritiska na već preko stanja gasa na samom izlazu iz isparivača, to jest dozvoljava se da samo tečna faza toplog gasa napusti isparivač. Ovo uzrokuje da kompresor relativno malu količinu gasa (nastalu ekspanzijom tečnosti sa pritiska otapanja na usisni pritisak kompresora) treba ponovo da komprimuje i to umnogome manju ne samo u odnosu na pritisno otapanje već i u odnosu na protok kada je isparivač u režimu hlađenja. Na istom isparivaču i pri istim uslovima rada, mereni su i upoređeni rezultati rada u obe metode otapanja kako bi se dobio merodavan zaključak. Analizom merenih podataka vidi se da je protok toplog gasa manji kod nove metode otapanja kao i da je vreme otapanja skraćeno.

**Key words:** otapanje toplim gasom, amonijačni isparivač, ušteta energije, vremena otapanja

During the operation of an air cooler – evaporator at temperatures below 0°C, ice forms on its surface reducing its efficiency. In industrial ammonia plants superheated steam from the compressor's pressure side is used as a medium for defrosting (since the term "hot gas" is often used in practice, this term will be used afterward in the text). The paper describes a new approach to defrosting by hot gas using its complete phase-change heat during the defrosting process. Thus, energy is saved by direct reduction of hot gas consumption (lower amount of gas is returned to the compressor's suction) and the defrosting time is reduced. The starting point for energy saving analysis is a frequently applied method of defrosting ammonia evaporators by hot gas controlled by a constant pressure valve (pressure controlled defrosting). This principle of defrosting is used to control the process through the pressure occurring in the evaporator during defrosting process, which does not lead to the complete condensation of hot gas. At the beginning of defrosting the entire flow-rate of hot gas will be condensed, but as the process goes on, lower and lower amount will be condensed and, eventually, the highest portion of the flowrate will be hot gas (i.e. wet vapour with high level of dryness), which unnecessarily burdens the compressor. In defrosting with complete condensation, the process is not controlled by pressure, but by gas state at the evaporator outlet, i.e. it is allowed that only the liquid phase of hot gas leaves the evaporator. This causes that a relatively small amount of gas (created by liquid expansion from the pressure of defrosting to the compressor's suction pressure) should be re-compressed by the compressor, and that amount is far smaller, not only in relation to pressure defrosting, but also in relation to the flowrate when the evaporator is in the cooling mode. On the same evaporator and under the same operation conditions, the operation results were measured and compared in both methods of defrosting in order to obtain a relevant conclusion. By analysing the measured data, one can see that the hot gas flowrate is lower for the new defrosting method and the defrosting time is reduced as well.

**Key words:** defrosting using hot gas, ammonia evaporator, energy saving, defrosting time

### 1 Uvod

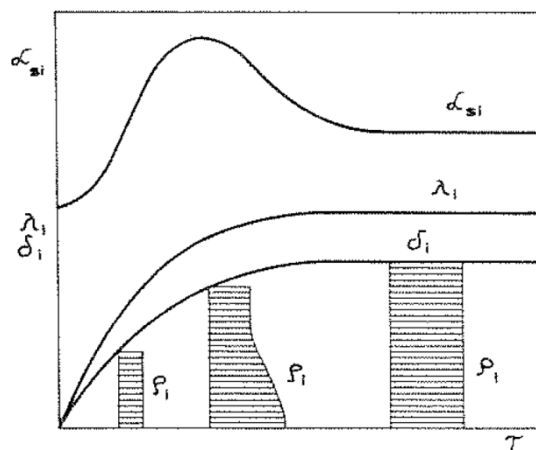
Potrošnja energije jedan je od najznačajnijih faktor u radu industrijskih postrojenja. Kada se uzme u obzir njihov celodnevni rad, relativno mala unapređenja dovode do velikih ušteda.

Jedan od značajnih potrošača energije predstavljaju rashladni kompresori u industrijama gde postoje zahtevi za hlađenjem (pivare, klanice, prehrambena industrija, hladnjače voća...). Smanjenjem količine pare/gasa koji oni kom-

\* Corresponding author's e-mail: vladimirbeljanski@vinca.rs

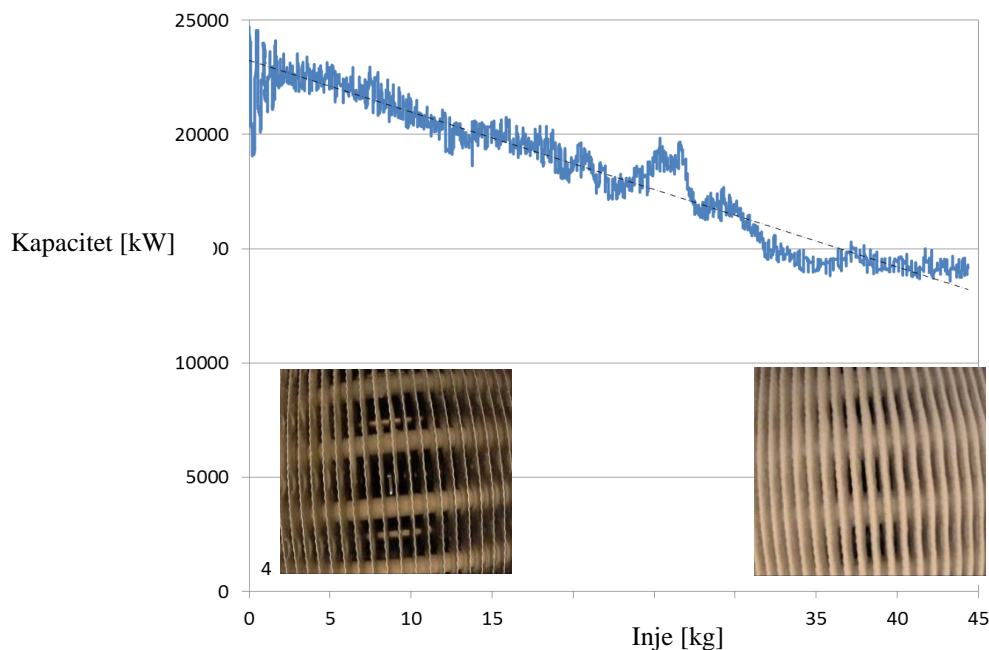
primaju ostvaruju se velike uštede. Jedan od načina za smanjenje količine pare/gasa koji se komprimuje je u toku procesa otapanja isparivača.

Prilikom rada vazдушnih isparivača čija je temperatura površine ispod 0°C (kada je temperatura isparavanja manja od 0°C) dolazi do neželjenog efekta izdvajanja vlage iz vazduha u vidu inja na površini isparivača. Ovaj proces je nestacionaran i u svojim ranim fazama obrazuje ravnomernu poroznu strukturu inja po površini isparivača. Nastala porozna struktura je hrapava što dovodi do povećanja prelaza toplote od 1,5 do 2 puta. Kako proces nastavlja da se odvija, raste i debljina i gustinja inja što dodatno povećava koeficijent prelaza toplote. Međutim, novonastalo inje popunjava predhodno nastale pore i površina inja polako gubi na hrapavosti što dovodi do smanjenja koeficijenta prelaza toplote. Na slici 1. [1] može se videti kako se u toku vremena, zbog povećanja debljine sloja inja, u početku povećava koeficijent prelaza toplote da bi posle dostizanja svoje maksimalne vrednosti počeo da opada.



Slika 1. Uticaj inja na koeficijent prelaza toplote:  $\alpha_{si}$  – koeficijent prelaza toplote,  $\lambda_i$  – koeficijent provođenja toplote,  $\rho_i$  – gustina inja,  $\delta_i$  – debljina inja,  $\tau$  – vreme [2]

Iako se u početku razmena toplote bolje odvija kada postoji prisustvo inja, pri dužem radu kapacitet isparivača značajno opada jer debljina inja raste što dovodi do efekta da inje predstavlja dodatni otpor, to jest izolator, pri razmeni toplote (slika 2.).



Slika 2. Uticaj inja na smanjenje kapaciteta isparivača

## 2 Metode otapanja

Led i inje negativno deluju na razmenu toplote, a samim tim i na potrošnju električne energije, s toga se isparivač mora otapati. Jedna od podela otapanja isparivača može biti prema vrsti toplotnog izvora koji se koristi, pa tako imamo *Eksterne* i *Interne* izvore toplote. Ekstreni izvori mogu biti električna energija (elektro-otporno otapanje grejačima) i voda. Internim izvorom se smatra topli gas (sa potisa kompresora).

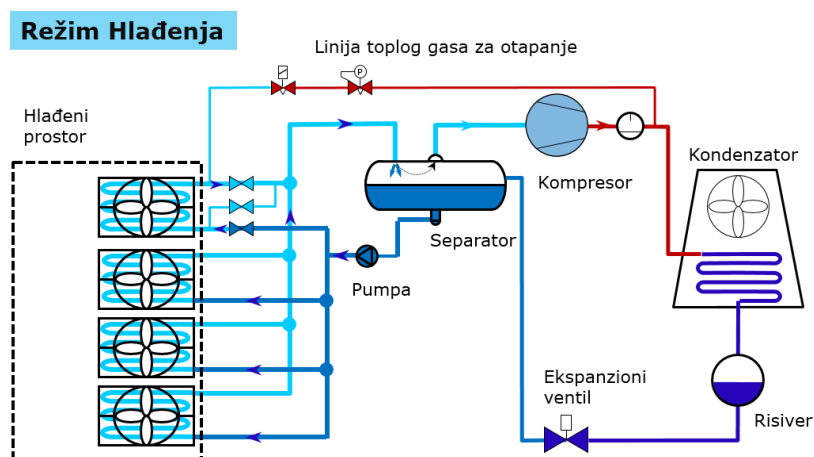
Elektro grejači (najčešće kod manjih freonskih sistema) su postavljeni u tok vazduha i rade samo u toku procesa otapanja. Sa stanovišta regulacije ovo je jednostavno rešenje, ali nije ekonomično. Razlog česte primene je niska investicija u odnosu na druge sisteme otapanja.

Drugi način otapanja eksternim izvorom je voda. Ovaj tip je bio dosta rasprostranjen kod većih sistema (uglavnom amonijačnih) jer upotreba elektro grejača u eksploataciji daje velike operativne troškove. Manjak ovakvog načina je što je potrebno obezbediti dovod i odvod vode, kao i vreme otapanja koje je duže nego kod ostalih sistema.

Topli gas za otapanje (interni izvor energije) predstavlja investiciono skuplje rešenje. Koristi se na većim sistemima gde operativni troškovi se značajno smanjuju što daje relativno brz povrat investicije. Vreme otapanja sa toplim gasom je brže nego otapanje vodom što je takođe veoma važan aspekt (posebno u industrijskim i procesnim postrojenjima), gde se mora voditi posebno računa o temperaturskim dilatacijama hladjenog objekta. Princip otapanja toplim gasom se zasniva na tome da se jedan deo toplog gasa sa potisa kompresora umesto u kondenzator preusmerava u zaleđeni isparivač. Topli gas, koji je znatno topliji od leda, kondenzuje se (toplotna promene faze iz gasnog u tečno stanje) predajući toplotu ledu koji se zagreva i topi. Klasičan način kontrolisanja procesa otapanja je preko pritiska koji vlada u isparivaču tokom otapanja. Nova metoda se zasniva na principu potpune kondenzacije toplog gasa. Proces otapanja se ne kontroliše preko pritiska već preko stanja gasa na samom izlazu iz isparivača, to jest dozvoljava se da samo tečna faza toplog gasa napusti isparivač.

### 3 Opis rada amonijačnog isparivača otapanog toplim gasom

Na slici 3. prikazana je uprošćena šema jednostepenog amonijačnog sistema. Kompresor sabija gas iz separatora sa pritiska isparavanja (pritisak zasićenja u separatoru, koji odgovara temperaturi isparavanja no kojoj se vrši hladjenje) na pritisak kondenzacije (pritisak u kondenzatoru).



Slika 3. Uprošćena šema amonijačnog postrojenja u režimu hlađenja

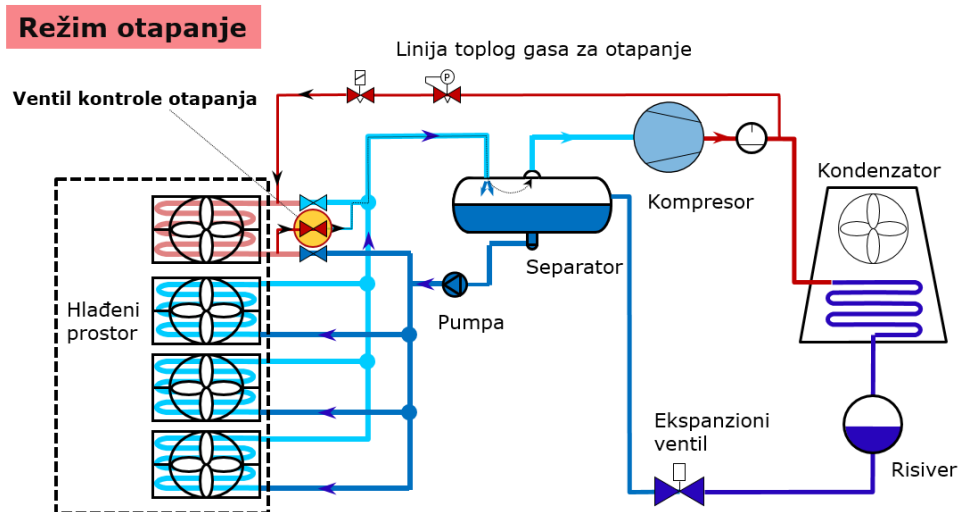
U kondenzatoru se topli gas kondenzuje i na izlazu imamo tečni amonijak koji dospeva u risiver. Od risivera tečnost struji do ekspanzionog ventila gde se pritisak snižava sa pritiska kondenzacije na pritisak isparavanja. Posle ekspanzionog ventila, usled efekta ekspanzije, strujanje je dvofazno. U separatoru gasna faza dospeva do usisa kompresora, a tečna do usisa pumpe. U isparivačima samo jedan deo tečnosti ispari što znači da na izlazu iz isparivača imamo dvofazni tok koji dospeva do separatora gde se vrši ponovno razdvajanje gasne i tečne faze.

Na slici 4. prikazan je režim rada kada je jedan od isparivača u režimu otapanja, a ostali su u režimu hlađenja.

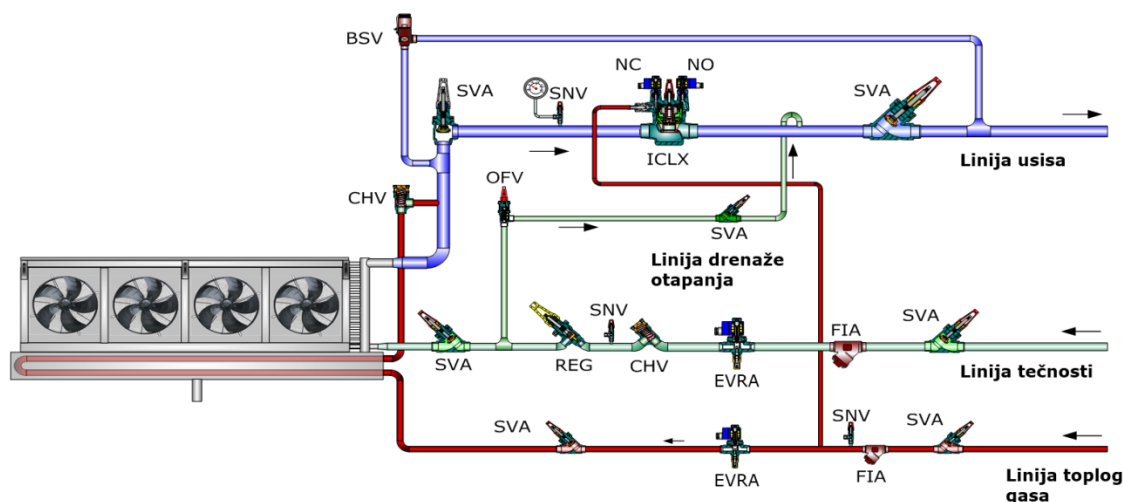
Rad kompresora, kondenzatora, pumpe i isparivača koji su u režimu hlađenja praktično nije promenjen. Promena je jedino kod isparivača koji je u režimu otapanja. Njemu se ne dovodi tečni hladni amonijak iz separatora već topli gas sa potisa kompresora (linija toplog gasa za otapanje). Praktično isparivač postoje dodatni kondenzator. Topli gas se kondenzuje, predajući toplotu promene faze ledu koji se otapa i nastavlja da struji prema ventilu konstantnog pritiska, koji kontroliše proces otapanja. Na ovom ventilu dolazi do ekspanzije rashladnog fluida, tj. snižava mu se pritisak sa pritiska otapanja do pritiska koji vlada u separatoru (isparivač u režimu otapanja je na višem pritisku nego separator).

Na slici 5. prikazana je klasična ventilska grupa amonijačnog isparivača koji je otapan toplim gasom (princip kontrole otapanja je preko održavanja konstantnog pritiska sa Danfoss armaturom). Isparivaču se preko tečnog voda dovodi tečni amonijak iz separatora. Na tečnom vodu nalaze se zaustavni ventil (SVA) koji služi da po potrebi (servisne intervencije) izoluje isparivač od ostatka instalacije. Sledeći je filter (FIA) čija je uloga da speči nečistoće da dospeju do osetljive opreme to jest u ovom slučaju solenoidnog ON/OFF ventila (EVRA). Uloga solenoidnog ventila je da se otvori kada postoji zahteh za hlađenjem i pusti tečni amonijak u isparivač. Kada nema potrebe za hlađenjem ventil je zatvoren. Nepovratni ventil (CHV) služi da zaustavi protok u suprotnom smeru tokom procesa otapanja (iako je tokom otapanja EVRA ventil zatvoren, on je diferencijalnog dejstva što znači da postoji mogućnost otvaranja jer tokom otapanja pritisak u isparivaču je veći od pritiska tečnosti u cevovodu ispred solenoidnog ventila). Regulacioni ventil (REG) ima za zadatak da "priguši" višak napora pumpe kako bi isparenje počelo odmah nakon ulaska u isparivač tj. da bi isparivač dobio potrebnu količinu tečnog amonijaka. to jest da bi se smanjila zona hlađenja tečnosti do stanja ključale tečnosti.

Poslednji u nizu ventila na tečnom vodu je zaustavni ventil (SVA) koji služi prilikom intervencija na ventilskoj grupi. U režimu hlađenja, tečnost dolazi do isparivača, isparava i nastavlja preko usisne linije da struji ka separatoru. Da bi se strujanje ostvarilo, usisni servo-pilot ventil (ICLX) mora da je potpuno otvoren. Ovaj ventil je ON/OFF ventil. Pre i posle njega su ugrađeni zaustavni ventili (SVA) koji su za servisne potrebe. ICLX za svoj pogon koristi topli gas što je i prikazano na slici 5. Na liniji usisa postoji obilazni vod sa sigurnosnim ventilom (BSV) koji služi da u slučaju prevelikog porasta pritiska u isparivaču (u havarijskim uslovima), zaobilazeći armaturu u usisnom vodu, rastereti isparivač direktnim povratom u usisni vod (praktično u separator).



Slika 4. Uprošćena šema amonijačnog postrojenja – režim otapanja



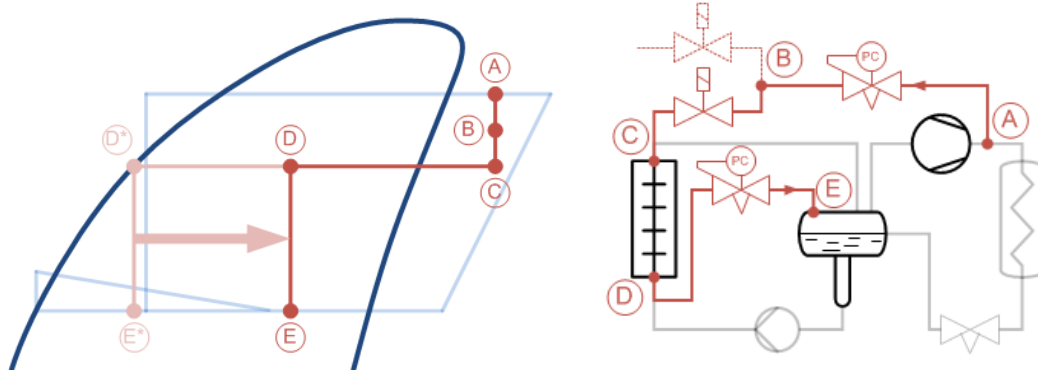
Slika 5. Klasična ventilska grupa amonijačnog isparivača – otapanje kontrolisano pomoću pritiska

U režimu hlađenja topli gas se ne dovodi u isparivač, na način što je solenoidni ON/OFF ventil (EVRA) u liniji toplog gasa zatvoren. U ovoj liniji još postoje dva zaustavna ventila (SVA) i jedan filter (FIA). "Pilotski" vod toplog gasa koji služi za pogon dvostepenog servo ventila ICLX je "uzet" pre solenoidnog ventila EVRA što omogućava rad ICLX ventila i tokom režima hlađenja. U liniji toplog gasa postoji dodatni nepovratni ventil (CHV) čija uloga je da u režimu hlađenja speći dovod hladnog amonijaka u tacnu/tavu isparivača čime bi se ona zamrzla.

Nakom prestanka režima hlađenja oba solenoidna ventila (EVRA u liniji tečnosti i ICLX u liniji usisa) se zatvaraju. Posle izvesnog vremena (čeka se "umirenje" amonijaka u isparivaču) ventil za dovod toplog gasa (EVRA u liniji toplog gasa) se otvara i otapanje počinje (stanje C je ulaz u isparivač na Slici 6.). Topli gas prvo ulazi u tacnu/tavu a zatim u usisnu cev. Pošto je ICLX ventil zatvoren strujanje je suprotno od smera u režimu hlađenja (strujanje od usisne ka tečnoj liniji). Pošto postoji nepovratni CHV ventil u tečnoj liniji kondenzovani gas (stanje D) ide linijom gde se nalazi ventil konstantnog diferencijalnog pritiska (OFV) i struji preko usisne linije ka separatoru (stanje E – niži pritisak od stanja D i veći sadržaj parne faze). Praktično ventil OFV održava konstantan pritisak otapanja. Ako pritisak u isparivaču previše poraste on se više otvori, ako opadne on se zatvori. Ovo je klasičan način otapanja toplim gasom kontrolisan preko pritiska koji vlada u isparivaču tokom otapanja, što ne garantuje potpunu kondenzaciju toplog gasa.

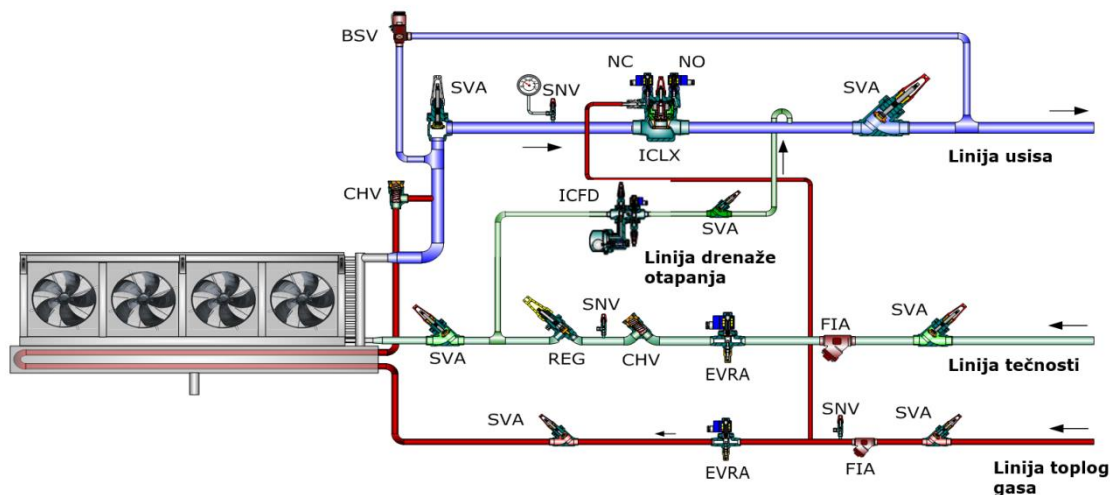
U početku otapanja, celokupan protok toplog gasa će se kondenzovati (na izlazu iz isparivača stanje D je isto kao i D'), dok kako proces teče sve će se manja količina kondenzovati, i pred kraj imamo situaciju da se vrlo malo gasa kondenzuje (stanje D više nije tečnost već je mešavina gasa i tečnosti) dok preostali deo gasa bespotrebno opterećuje kompresor (čak i u većoj količini nego kada je isparivač u režimu hlađenja). Nakon završetka procesa otapanja EVRA

ventil u liniji toplog gasa se zatvara. Nakon izvesnog vremena (“umirenje” amonijaka) otvara se ICLX ventil koji nije klasičan ON/OFF ventil, već je dvostepeni. To znači da se prvo otvori prvi stepen koji propušta manju količinu amonijaka iz isparivača u usisni cevovod (10% od max. protoka). Kada se pritisci između isparivača i usisnog cevovoda izjednače otvara se drugi stepen i tek onda ventil propušta celokupan protok i vraćen je u nominalni režim hlađenja. Na ovaj način izbegnuti su hidraulični udari koji se javljaju nakon nagle ekspanzije toplog u hladan amonijak.



Slika 6. Prikaz procesa otapanja konstantnim pritiskom u logp-h diagramu

Na Slici 7. prikazana je ventilska grupa amonijačnog isparivača koji je otapan toplim gasom: princip kontrole otapanja je preko potpune kondenzacije amonijaka, takodje sa Danfoss armaturom.

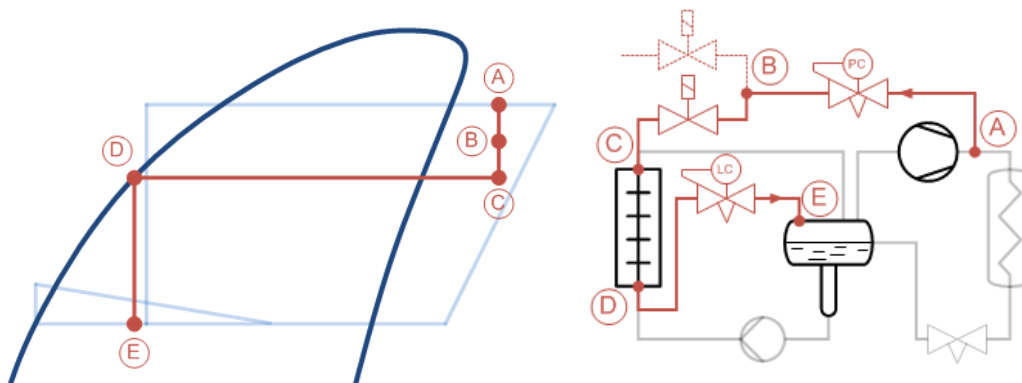


Slika 7. Klasična ventilska grupa amonijačnog isparivača – otapanje kontrolisano preko potpune kondenzacije amonijaka sa ventilom sa plovkom

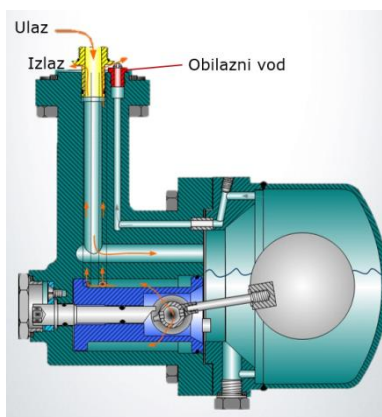
Nova metoda se zasniva na principu potpune kondenzacije toplog gasa. Proces otapanja se ne kontroliše preko pritiska već preko stanja gasa na samom izlazu iz isparivača, to jest dozvoljava se da samo tečna faza toplog gasa napusti isparivač (izlaz iz isparivača je uvek takav da je stanje D na graničnoj krivi – slika 8.). Ovo uzrokuje da kompresor relativno malu količinu gasa (nastalu ekspanzijom tečnosti sa pritiska otapanja na usisni pritisak kompresora – stanje E je uvek isto) treba ponovo da komprimuje i to umnogome manju ne samo u odnosu na pritisno otapanje (stanje E sa slike 8. ima mnogo manje gasa nego stanje E sa slike 7.) već i u odnosu na protok kada je isparivač u režimu hlađenja. Praktično, instalacija je identična predhodnoj na slici 7, ali umesto ventila konstantnog pritiska OFV je ugrađen ventil sa plovkom (ICFD).

Plovak onemogućava gasu da napusti isparivač, to jest tek kada u kućištu ventila imamo dovoljno tečnosti, ona podigne plovak koji otvara ventil i tečnost tada može da napusti isparivač (slika 9.). Kada nivo tečnosti padne, plovak zatvara ventil i ciklus se ponavlja.

Amonijačna armatura se uglavnom ugrađuje iznad samog isparivača. Pošto je ventilu sa plovkom potrebna tečnost da bi radio, a imamo potrebu da podignemo tečnost na određenu visini, da bi se izbegli parni čepovi ICFD ventil ima u sebi ugrađen obilazni vod za gasnu fazu. Ovaj obilazni vod dimenzionisan je za jako mali protok gasa (dovoljan za normalan rad) čime efikasnost principa potpune kondenzacije nije ugrožena. Kao što se može videti iz prikazane konstrukcije ICFD ventil bi bio otvoren pri režimu hlađenja i iz tog razloga pre ili posle njega potrebno je ugraditi solenoidni ON/OFF ventil koji je otvoren u toku procesa otapanja, a zatvoren u procesu hlađenja. Takođe, ICFD ventil je deo Danfoss-ove familije ICF ventilskih grupa. Ventilska grupa je multifunkcionalni sklop koji u suštini sadrži više komponenti u jednom kućištu. Tako i ICFD u sebi pored ventila sa plovkom poseduje i solenoidni ventil. Pored toga zavisno od konfiguracije može posedovati zaustavni ventili, filter ili njihovu kombinaciju.



Slika 8. Prikaz procesa otapanja potpunom kondenzacijom u logp-h diagramu



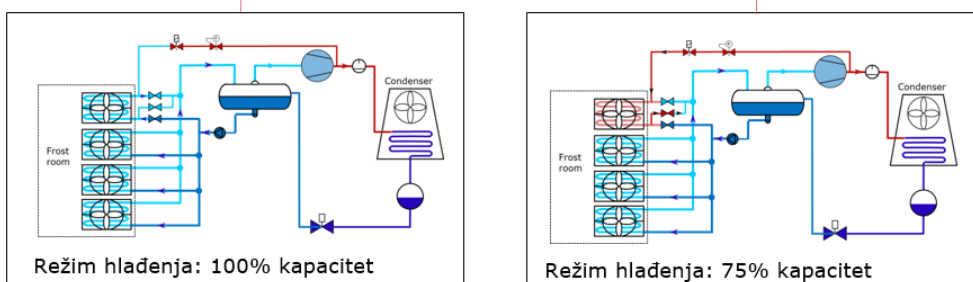
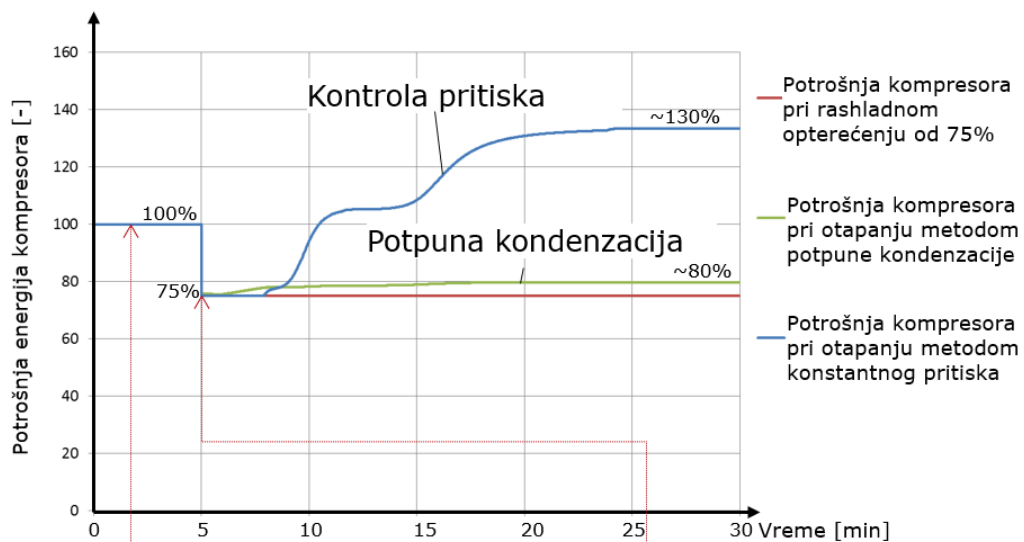
Slika 9. Ventil sa plovkom – Danfoss ICFD

#### 4 Opterećenje kompresora prilikom otapanja

Ako se analizira potrošnja kompresora tokom otapanja može se doći do zaključka prikazanog na slici 10. Kao referenca potrošnje električne energije uzeto je 100% rashladno opterećenje koje daje 100% potrošnje – u režimu hlađenja 4 od 4 isparivača (isparivači identične snage). Da bi se prešlo na otapanje jednog isparivača on se prvo mora isključiti sa režima hlađenja. U tom trenutku potrošnja kompresora je na otprilike 75% od referentne vrednosti. Ako analiziramo otapanje kontrolisano pritiskom vidimo da u početku opterećenje kompresora ne raste. To je zato što se iz isparivača izbacuje tečnost koja se u njemu nalazila i zato što se celokupan protok toplog gasa kondenzuje. Kako proces otapanja teče sve se manje gasa kondenzuje i sve više gasa, a sve manje tečnosti struji ka usisu kompresora. U jednom trenutku ta količina gasa prevazilazi referentnu snagu kompresora od 100% i raste do otprilike 130% na kraju procesa otapanja. Ovo je logično kada se uzme u obzir da je protok toplog gasa za otapanje od 2 do 4 puta veći od protoka koji je potreban za dati rashladni učinak isparivača.

Iz priloženog se vidi da kompresori za ovakav režim otapanja nemaju dovoljan kapacitet. Zato u praksi operateri vode računa kada otapaju sistem da kompresori uvek imaju dovoljni kapacitet. U razmatranom slučaju to bi značilo da bi dva isparivača mogla da budu u radu, jedan isključen a jedan na otapanju.

Kod otapanja metodom potpune kondenzacije situacija je drugačija. Opterećenje kompresora tokom otapanja blago raste i posle dostizanja od oko 80% ostaje praktično konstantno do kraja procesa (tačke D i E na slici 8. su fiksne). I ovde imamo slučaj da nam je potrebna veća snaga kompresora nego kada ne bi bilo otapanja ali daleko manja nego u prvom slučaju. Takođe, ovde imamo situaciju da bi preostala tri isparivača mogla da ostanu u režimu hlađenja dok se jedan isparivač otapa. Ostaje da se odgovori na pitanje zašto uopšte imamo povećanje potrošnje sa 75% na 80% kada imamo potpuno kondenzaciju. Odgovor leži u dva kombinovana efekta. Prvi dominantni je samo fizika da kada tečnost sa granične krive (stanje D) ekspandira na niži pritisak (stanje E) uvek moramo imati određeni procenat gasa. Drugi je obilazni vod na ICFD-u koji je neophodan zbog postavljanja ventila iznad isparivača.



Slika 10. Rad kompresora pri otapanju: Kontrola otapanja pritiskom nasuprot kontrole potpunom kondenzacijom

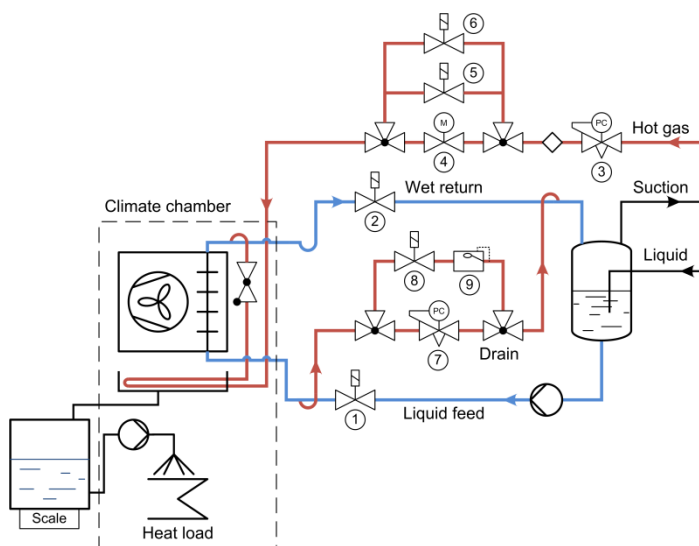
## 5 Laboratorijska merenja protoka toplog gasa u režimima otapanja (DTI)

Laboratorijsko ispitivanje u Danskom tehnološkom institutu (DTI) sastojalo se od pumpnog sistema cirkulacije tečnog amonijaka i komore s kontrolisanom atmosferom. Količina leda dodanog na površinu isparivača tokom hlađenja je kontrolirana, a tokom odleđivanja se meri količina uklonjenog leda. Dotok toplog gasa je regulisan ventilom poz. 3 prema pritisku zasićenja oko 7,3 bar (ulaz ventila toplog gasa (4) ili (5,6)) sa pritiskom kondenzacije 12 bar (vidi Sliku 11.).

Osim merenja raznih pozicija temperature i pritisaka vršena su merenja potrošnje el. energije celog sistema te merenja protoka kroz isparivač tokom otapanja. Na kraju su rezultati uštede upoređeni.

*Tehnički podaci ispitivanog isparivača:*

Raspored cevi	Redni	Rashladni kapacitet	21.8 kW
Broj kolona cevi	8	Temp. isparavanja	-35°C
Broj redova cevi	18	ETD (Tair,in - Te)	10°C
Dužina cevi	1,360 mm	Faktor recirkulacije	3
Spoljni prečnik cevi	15.6 mm	Protok vazduha	14,692 m <sup>3</sup> /h
Unutrašnji prečnik cevi	14.6 mm	Brzina vazduha na ulazu	3.4 m/s
Razmak cevi	50x50 mm	Temp. vazduha na ulazu	-25°C
Korak lamela	12 mm	Temp. vazduha na izlazu	-28.5°C
Debljina lamela	0.5 mm	Zapremina cevi isparivača	34.5 L
Materijal cevi	AISI 304	Zapremina razdelnika tečnosti	0.5 L
Rebra	Aluminijum	Zapremina usisnog razdelnika	1.0 L



Popis ventila (Danfoss):

- 3: Pritisno regulacioni ventil ICS+CVC
- 5: Elektromagnetni ventil EVRA
- 6: Motorni ventil ICM (sporo otvarajući)
- 7: Pritisno regulacioni ICS+CVP
- 8: Elektromagnetni ventil uključen u ICF ventilski sklop
- 9: Ventil s plovkom za regulaciju potpune kondenzacije u ICF ventilskom sklopu

Slika 11. Šema ispitnog sistema s popisom ventila

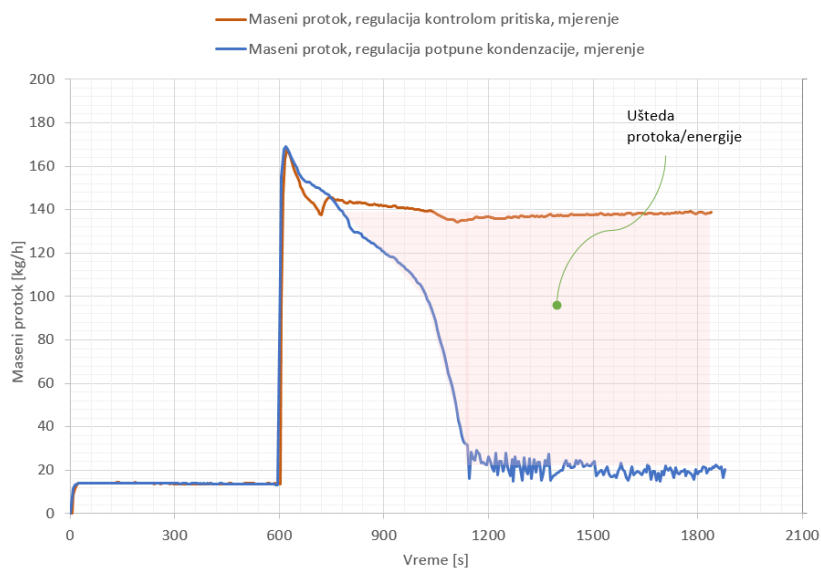
U početnom periodu otapanja, protok toplog gasa je regulisan manjim ventilom (kapacitet 10% glavnog ventila) ili pomoću sporo otvarajućeg motornog ventila:

- Postupak meko otvaranje pomoću manjeg ventila: prvo se otvori manji ventil (6) u periodu 10 minuta a nakon toga glavni ventil za otapanje (5). Manji ventil ima otprilike 10% kapaciteta glavnog ventila za otapanje. Prikazana merenja se odnose na ovaj tip regulacije početka otapanja.
- Sporo otvarajući motorni ventil: motorni ventil (4) sporo otvara (od zatvorene pozicije do potpune otvorenosti 160s).

Temperatura u separatoru tečnosti regulisana je tokom svih mjerenja na -22°C. Tokom regulacije otapanja kontrolom pritiska, pritisno regulacioni ventil (7) je podešen na pritisak od 5,6 bar (7,3°C)

Radni uslovi

	Pritisak zasićenja	Temperatura zasićenja
	bar	°C
Temperatura kondenzacije	12,0	31,0
Regulacija toplog gasa	7,3	15,0
Pritisak otapanja	5,6	7,3
Separator tečnosti	1,7	-22

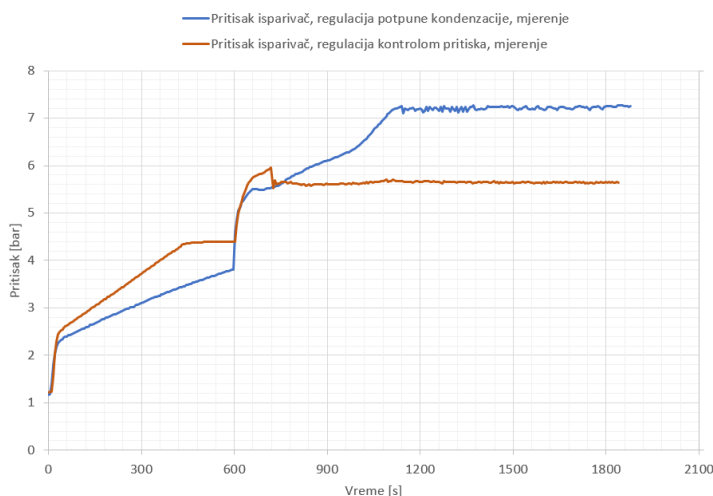


Slika 12. Izmeren maseni protok za različite metode regulacije otapanja toplim gasom



Na slici 12. U početku je minimalan protok (oko 16 kg/h) zbog korištenja manjeg elektromagnetnog ventila a u trenutku 600 s (10 minuta) od početka procesa otapanja vidljiv je vršni skok protoka nastao otvaranjem glavnog ventila za otapanje, te je on isti za oba tipa regulacije otapanja. U periodu 800-900 s dolazi do prve razlike u masenom protoku jer metoda regulacije s plovkom počinje prigušivati protok zavisno od nastalog kondenzata a u 1200 s nakon početka glavnog otapanja protok je gotovo u potpunosti prigušen i ostvaruje se minimalni protok kondenzata kroz isparivač.

Protok toplog gasa pri pritisknoj regulaciji ostaje stalan do kraja procesa otapanja oko 140 kg/h.



Slika 13 Izmeren pritisak toplog gasa na ulazu u isparivač

Zapažanja:

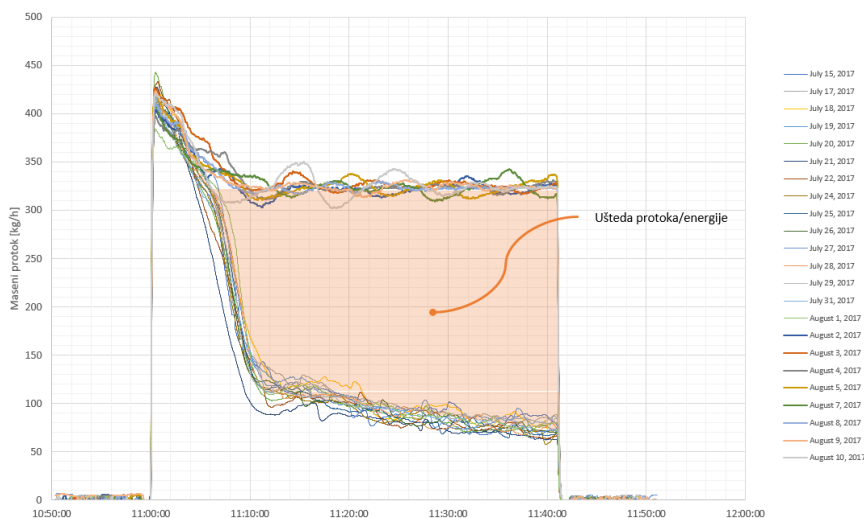
- Tokom perioda punjenja (600 s) pri čemu se otvara prvi korak elektromagnetnog ventila toplog gasa pritisak u isparivaču raste sporije za metodu kontrole potpune kondenzacije. To je zato što se ICFD ventil otvara čim je tečnost prisutna u odvodnom cevovodu.
- Za metodu regulacije pritiskom, vidljivo je da se pritisak u isparivaču mora podići iznad podešenog pritiska regulacionog ventila kako bi se on otvorio i počeo regulisati. Skok je u 720 s od početka otapanja.
- Za metodu regulacije pritiskom, led se počinje topiti nešto pre nego što se otvori glavni ventil.
- Za regulaciju potpune kondenzacije pritisak na kraju otapanja je veći, ali on postepeno raste, jer pritisak u isparivaču raste s obzirom kako ICFD ventil počinje prigušivati protok zbog sve manje količine kondenzata.

## 6 Merenja protoka toplog gasa u režimima otapanja na objektu Raitan

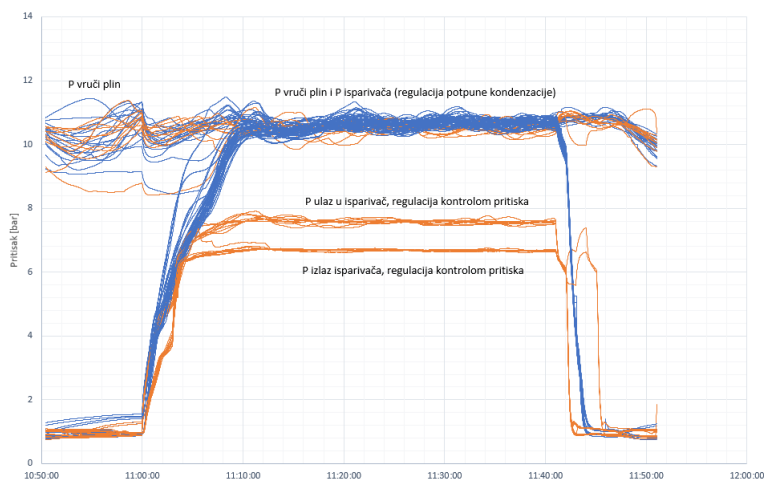
Dva isparivača u velikom skladišnom prostoru u Raitan Horsens su bila opremljena s nizom merne opreme, kao i kod DTI merila se potrošnja el. energije sistema i maseni protok kroz isparivač tokom procesa otapanja. Slika 14. pokazuje rezultate ispitivanja za jedan isparivač u periodu od 2 nedelje – jedan nedelja otapanjem sa regulacijom pritiska a druga nedelja s metodom potpune kondenzacije.

Uslovi i rezultati:

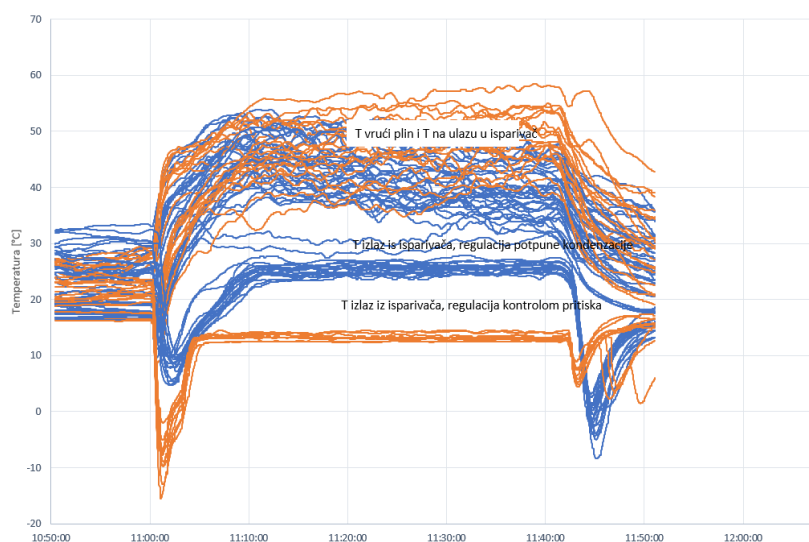
- Isparivač: 41 kW @ -25°C
- Otapanje: 40 minuta, jednom dnevno



Slika 14. Terenska ispitivanja na objektu Raitan. Maseni protok prema dve metode otapanja.



Slika 15. Terenska ispitivanja na objektu Raitan. Merenje pritiska na ulazu i izlazu iz isparivača kao i pritisak toplog gasa pre ulaska u isparivač.

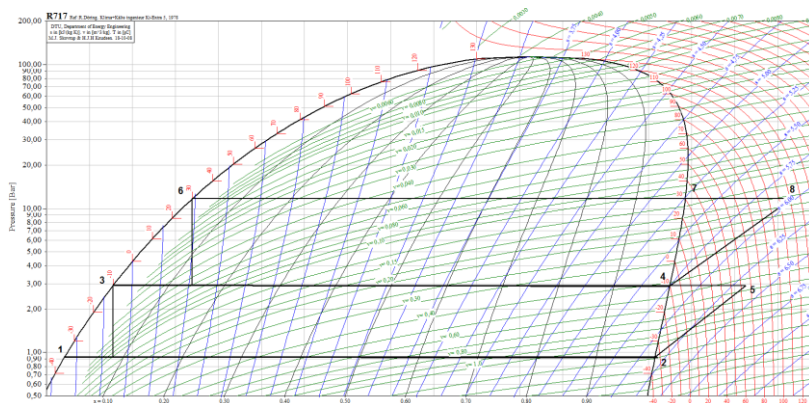


Slika 16. Terenska ispitivanja na objektu Raitan. Merenje temperatura na ulazu i izlazu iz isparivača kao i temperatura toplog gasa pre ulaska u isparivač.

## 7 Proračun ušteda energije korištenjem metode otapanja toplim gasom regulacijom potpune kondenzacije u odnosu na pritisno regulišuću metodu

Za proračun uštede, potrebno je proceniti veličinu "osenčanog" na grafikonu (DIT i Reitan), i iz tog podatka se dobije razlika masenog protoka prema dve različite metode otapanja. Proračun uštede energije se svodi na proračun potrebnog rada da bi se ponovo ista masa gasa dovela na stanje nakon kompresije visokog stepena sistema (11,7 bar). Zbog pojednostavljenja nisu u proračunu predviđeni padovi pritiska u cevovodu a isentropska efikasnost kompresora je pretpostavljena 0,7.

DTI	t	p	h	Reitan	t	p	h
Tačke	°C	bar	kJ/kg	Tačke	°C	bar	kJ/kg
8	30	11,67	1878	8	30	11,67	1878
7	30	11,67	1629	7	30	11,67	1629
6	30	11,67	485	6	30	11,67	485
5	-10	2,91	1770	5	-10	2,91	1691
4	-10	2,91	1594	4	-10	2,91	1594
3	-10	2,91	297	3	-10	2,91	297
2	-35	0,93	1559	2	-25	1,51	1574
1	-35	0,93	184	1	-25	1,51	229



Slika 17. Log-ph dijagram sistema s dvo-stepenom kompresijom i označenim tačkama procesa

Usteda

$$mHG ((h5 - h2) + (h8 - h4))$$

Lokacija	Nominalni kapacitet isparivača kW	Nominalni kapacitet pri Te °C	Vreme otapanja min	Izmerene el. uštede metodom potpune kondenzacije kWh/otapanju	mHG razlika u masenom protoku kg	Izračunate uštede preko masenog protoka kWh/otapanju
DTI	22	-35	35	5,0	37,5	5,2
Reitan	41	-25	40	12,6	115,0	12,8

Na godišnjem nivou ušteta na jednom isparivaču, s jednim otapanjem na dan a prema procenjenoj ceni električne energije od 0,1 EUR/kWh iznosi:

DTI

$$(5 \text{ kWh} \times 0,1 \text{ EUR/kWh}) \times 365 \text{ dana} = 183 \text{ EUR}$$

Reitan

$$(12,6 \text{ kWh} \times 0,1 \text{ EUR/kWh}) \times 365 \text{ dana} = 460 \text{ EUR}$$

## 8 Zaključak

Otapanje toplim gasom je najčešća korištena metoda otapanja isparivača u industrijskom hlađenju. Regulacija procesa kontroliranjem pritiska otapanja je vrlo raširena metoda, ali prikazana merenja jasno pokazuju da ova metoda omogućava velikoj količini nekondenzovanog toplog gasa da prođe kroz isparivač, povisi opterećenje kompresora, i smanji efikasnost otapanja.

Metoda otapanja regulacijom potpune kondenzacije ima višu efikasnost jer samo kondenzirana tečnost struji prema separatoru pa se onda iskoristiti za proces hlađenja tj. nije je potrebno komprimovati na pritisak kondenzacije. Temperatura rashladnog sredstva na izlazu iz isparivača će na kraju biti nešto viša u odnosu na metodu regulacije pritiskom. To se javlja s obzirom da ova metoda omogućava rast pritiska toplog gasa do vrednosti koja dolazi na ventilsku grupu toplog gasa. Iz tog razloga će se isparivač više zagrejati, u ukupnom vremenu brže otopiti isparivač. Toplinski gubiteci konvekcijom prema komori će biti nešto viši ali znatno manji trošak električne energije za ponovno hlađenje isparivača i prostora u odnosu koliko se izgubi povećanim protokom toplog gasa u metodi regulacije kontrolom pritiska.

Analiza mjerenja:

- Sporo otvarajući ventil (motorni ventil) u cevovodu toplog gasa je odlično rešenje za osiguranje postepenog porasta pritiska (ventil je potrebno dimenzionisati prema 10 do 30% kapaciteta glavnog ventila)
- Efikasnost metode regulacije kontrolom pritiska je značajno osetljivija na podešavanja oko prekida otapanja u odnosu na metodu regulacije potpune kondenzacije.
- Tokom procesa otapanja metodom regulacije kontrolom pritiska, opterećenje sa isparivača na kompresor je viša u odnosu na normalni proces hlađenja te treba uzeti u obzir prilikom slaganja termina otapanja na celom

postrojenju kako ne bi došlo do preopterećenja kompresora i nemogućnosti postizanja traženih referentnih vrednosti.

Prilikom dimenzioniranja sistema otapanja metodom regulacije kontrolom pritiska, uzimajući u obzir regulaciju masenog protoka prema podešenom pritisku u kontrolnom ventilu, pad pritiska na ulaznom cevovodu u isparivač je vrlo važan jer to utiče na celi proces.

Ako se koristi regulacija potpune kondenzacije, dotok toplog gasa je kontrolisan stvarnim protokom kondenzata, i konstrukcijski zahtevi su manje osetljivi zbog samo regulisućeg ventila s plovkom ICFD.

## 9 Reference

- [1] Markovski, Rashladnji uređaji, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, 2006.
- [2] Vujić, S., Markovski, M., Pejković, S., Raičević, R., Hrnjak, P., Rashladnji uređaji, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, 1980.
- [3] Energy and Function Analysis of Hot Gas Defrost in Ammonia Refrigeration Systems, Niels Vestergaard, Global Application Excellence Manager, Industrial Refrigeration, i Morten Juel Skovrup, Global Applications Excellence Manager, Industrial Refrigeration, Danfoss A/S
- [4] Effective and cost-efficient hot gas defrost methods, 2017
- [5] Niels P Vestergaard, Global Application Expert, Industrial Refrigeration, Danfoss A/S