

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 21	str. 93-102	Zagreb, 2009.
----------------------------------	---------	-------------	---------------

UDK 622.279.8
UDC 622.279.8

Pregledni rad
Preview

Jezik/Language :Hrvatski/Croatian

PREGLED PROCESA UKAPLJIVANJA PRIRODNOG PLINA

REVIEW OF NATURAL GAS LIQUEFACTION PROCESSES

KATARINA SIMON, MATIJA MALNAR, VANJA VRZIC

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: prirodni plin, proces ukapljivanja, rashladno sredstvo

Key words: natural gas, liquefaction process, refrigerant

Sažetak

Prirodni plin se od izvora do potrošača najčešće transportira visokotlačnim plinovodima. Kada je udaljenost između mjesta proizvodnje i potrošnje veća od 4000 km, a i zbog diversifikacije dobavnih pravaca prirodnog plina, sve se više primjenjuje ukapljivanje prirodnog plina i njegov transport brodovima. Konačan izbor procesa za ukapljivanje prirodnog plina ovisiti će o varijablama projekta, stupnju razvoja novih ili poboljšanja postojećih procesa i raspoloživosti potrebne opreme. U radu su prikazani procesi koji se danas primjenjuju za ukapljivanje prirodnog plina i njihova zastupljenost u praksi.

Abstract

High pressure pipelines are the most common way of natural gas transport from a gas field to a processing plant and further to consumers. In case when the distance between natural gas production and consumption regions is more than 4000 kilometers, and due to necessity of natural gas supply diversification, gas liquefaction and its transport by ships is being applied. The final choice of liquefaction process depends on the project variables, the development level of new or upgrading of already existing processes and available equipment. Current natural gas liquefaction processes and their usage in practice are shown in this paper.

Uvod

U siječnju 2009. godine obilježeno je 50 godina od prvog transporta ukapljenog plina brodom (brod Methane Pioneer preveo je ukapljeni plin iz SAD u Veliku Britaniju). Tada je započeo razvoj tehnologije ukapljivanja prirodnog plina koji još uvijek traje.

Odabir procesa ukapljivanja prirodnog plina počinje u ranoj fazi razvoja projekta, najčešće tijekom izrade studije izvedivosti u kojoj je jedan od ključnih ulaznih podataka količina plina za ukapljivanje. Postrojenja za ukapljivanje najčešće su smještena uz obalu i u blizini luka s većom dubinom mora zbog prihvata brodova sve veće zapremine koji odvoze ukapljeni prirodni plin. Postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina mogu biti izgrađena i kao plutajući objekti usidreni u blizini kopnenih ili priobalnih polja prirodnog plina.

Usprkos tome što u svijetu postoji ili je u izgradnji više od 90 postrojenja za ukapljivanje (zeuslibrary, 2009), planira se izgradnja novih. Buduća postrojenja će imati kapacitet ukapljivanja i veći od 8×10^6 t/god po jedinici za ukapljivanje što odgovara količini prirodnog plina od $29,36 \times 10^6$ m³/dan. S povećanjem prometa ukapljenim prirodnim plinom nastavljaju se tražiti načini za smanjenje troškova postupka ukapljivanja.

Tehnologija ukapljivanja prirodnog plina

Usprkos složenosti, postrojenja za ukapljivanje su zapravo veliki hladnjaci, a hlađenje je bit procesa ukapljivanja. Budući je hlađenje povezano s velikom potrošnjom energije, postojeća komercijalna postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina nastoje svesti na minimum razliku u temperaturi između prirodnog plina koji se podvrgava hlađenju i rashladnog sredstva pomoću kojeg se plin hladi. To se postiže odabirom rashladnog sredstva i primjenom više ciklusa hlađenja. Na svim modernim postrojenjima za ukapljivanje, prirodni plin se ukapljuje kroz dva ili tri ciklusa hlađenja.

Postrojenja za ukapljivanje objedinjuju čišćenje ulaznog plina, njegovo ukapljivanje i skladištenje s punjenjem plovila. Čišćenje plina podrazumijeva uklanjanje neželjenih primjesa iz prirodnog plina (voda, dušik, živa, kiseli plinovi, tj. sumporovodik i ugljični dioksid, visokomolekularni ugljikovodici i sl.). Voda i ugljični dioksid se uklanjaju kako bi se spriječilo stvaranje hidrata tijekom ukapljivanja, što može dovesti do začepjenja vodova i druge opreme. Dušik se izdvaja zbog mogućeg slojevitog odvajanja u spremniku ukapljenog plina, a živu treba ukloniti do granice manje

od $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jer će veća količina uzrokovati koroziju aluminijske od kojeg su izrađeni izmjenjivači topline (McIntosh et al., 2008). Kisele plinove, osim kao uzročnike korozije, treba izdvojiti i zbog zadovoljenja specifikacija o kvaliteti izlaznog plina nametnutih od strane kupca odnosno zakonskih akata koji definiraju maksimalnu dozvoljenu emisiju plinova u atmosferu. Visokomolekularni ugljikovodici uklanjaju se zbog postizanja potrebne vrijednosti Wobbeovog indeksa ukapljenog plina, a i zbog cijene koju postižu na tržištu.

Nakon čišćenja, prirodni plin ulazi u dio postrojenja u kojem se obavlja ukapljivanje. Najčešće se u okviru postrojenja nalaze dvije ili više jedinica za ukapljivanje (engl. train). Učinkovitost postrojenja za ukapljivanje uvelike ovisi o rashladnim sredstvima, kompresorima i izmjenjivačima topline koji sudjeluju u procesu. Način ukapljivanja i oprema koja se pritom koristi uvjetuju učinkovitost, pouzdanost i cijenu čitavog postrojenja za ukapljivanje. Obično 30 do 40% od ukupnog ulaganja u postrojenje otpada na dio za ukapljivanje (Shukri, 2004). Procesi za ukapljivanje plina mogu se općenito podijeliti na tri tipa: kaskadni proces, proces s miješanim rashladnim sredstvom i proces s ekspanzijom (Wood et al., 2007). Danas se za ukapljivanje prirodnog plina najčešće primjenjuju sljedeći procesi:

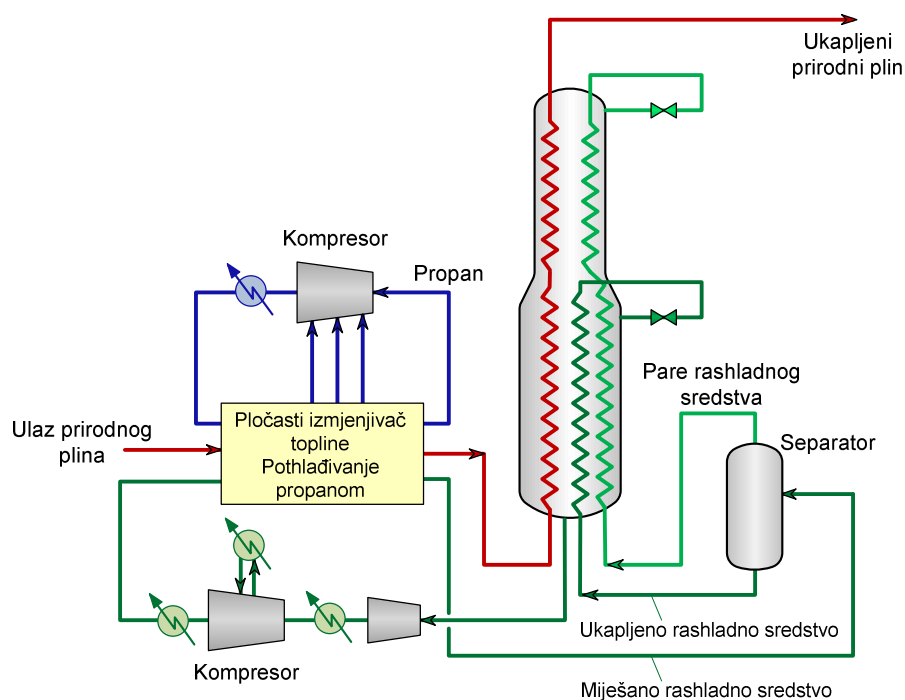
- Proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom (engl. Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant Process - C3 MR).
- Modificirani procesi s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom - C3MR/Split i AP-X proces.

- Optimizirani kaskadni proces.
- Kaskadni proces s miješanim fluidima (engl. Mixed Fluid Cascade Process - MFC).
- Proces s dva miješana rashladna sredstva (engl. Dual Mixed Refrigerant Process - DMR).
- Liquefin proces.
- PRICO proces.

Proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom

Proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom u literaturi najčešće nazvan C3MR proces, razvila je kompanija Air Products & Chemicals Int. (APCI), a počeo je dominirati industrijom kasnih sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Ovaj se proces primjenjuje u najvećem broju postojećih postrojenja za ukapljivanje (Bosma, Nagelvoort, 2009).

Shema procesa prikazana je na slici 1. Proces karakteriziraju dva glavna ciklusa hlađenja. Ciklus pothlađivanja u kojem se kao rashladno sredstvo koristi čisti propan i drugi ciklus, koji objedinjuje ukapljivanje i dohlađivanje prirodnog plina, u kojem se koristi miješano rashladno sredstvo koje je mješavina dušika (1%), metana (27 do 30%), etana (50%), propana (18 do 20%) i butana (1 do 2%).



Slika 1. Proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom – C3MR proces

Figure 1 Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant Process – C3MR Process

U prvom ciklusu, ciklusu pothlađivanja, korištenjem propana kao rashladnog sredstva, kroz tri ili četiri stupnja promjene tlaka, temperatura plina koji se ukapljuje smanjuje se do -35°C . Nakon pothlađivanja prirodni plin prolazi kroz cijevi spiralnog izmjenjivača topline (engl. Spiral Wound Heat Exchanger - SWHE), koji se u literaturi često naziva i glavni kriogenički izmjenjivač topline (engl. Main Cryogenic Heat Exchanger – MCHE), gdje se pomoću miješanog rashladnog sredstva ukapljuje i dohlađuje (drugi ciklus ukapljivanja). Propan se koristi i za hlađenje i djelomično ukapljivanje miješanog rashladnog sredstva.

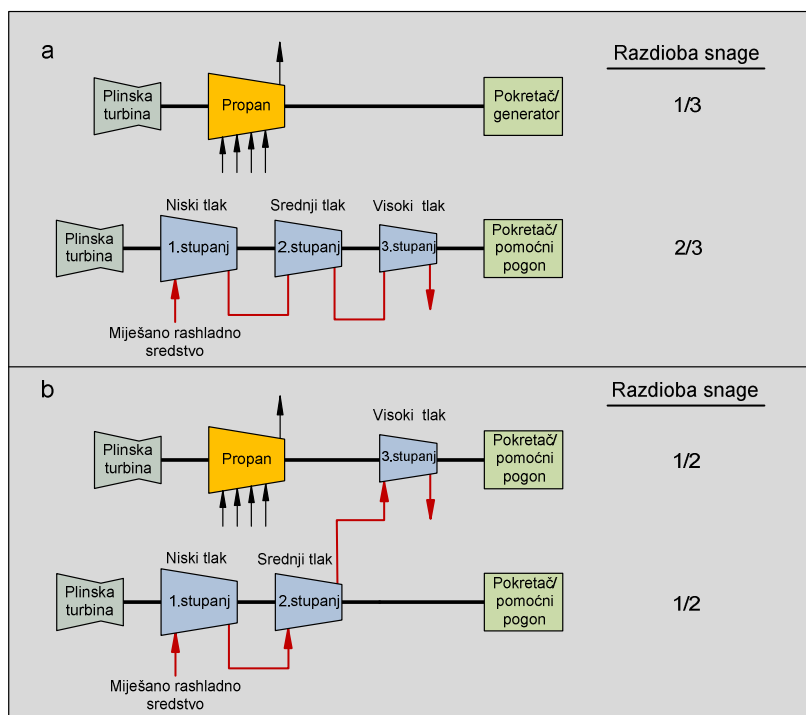
Miješano rashladno sredstvo se prije ulaska u izmjenjivač topline razdvaja u separatoru na struju kapljevine (teške komponente rashladnog sredstva - propan, butan i dio etana) i pare (lakše komponente rashladnog sredstva – metan, etan, dušik). Plin i struje rashladnog sredstva ulaze u cijevi na dnu izmjenjivača topline i protječu prema gore pod određenim tlakom. Plin na vrhu izmjenjivača topline izlazi u kapljevitom stanju i skladišti se. Struja miješanog rashladnog sredstva u kapljevitom stanju nakon izlaska iz cijevi prolazi kroz prigušnicu i usmjerava se na stijenke kućišta. Protječući prema dolje isparava i osigurava hlađenje donjeg dijela cijevi. Pare rashladnog sredstva prolaze cijevima do vrha izmjenjivača topline i pritom se ukapljuju i pothlađuju te se usmjeravaju preko prigušnice na stijenke kućišta izmjenjivača topline. Protjecanjem prema dolje hlade cijevi (plin u njima) u gornjem dijelu izmjenjivača topline, a nakon miješanja s

rashladnim sredstvom u kapljevitom stanju i cijevi u donjem dijelu izmjenjivača topline. Nakon skupljanja struje uparenog miješanog sredstva s dna izmjenjivača, ista se pomoću kompresora stlačuje na tlak između 45 i 48 bara. Hladi se i djelomično ukapljuje, prvo pomoću vode ili zraka, a nakon toga pomoću propana i ponovo se vraća u izmjenjivač topline.

Modificirani procesi s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom

C3MR/SplitMR process

Prije 2003. godine kompresore za stlačivanje propana i rashladnog sredstva pogonili su zasebni motori (slika 2a). Pritom je kompresor za stlačivanje propana trošio oko jedne trećine od ukupne snage potrebne za hlađenje, dok se ostatak snage trošio za hlađenje rashladnog sredstva. Poboľšanje u smislu korištenja istog pogonitelja za stlačivanje propana i povećanja tlaka pri stlačivanju rashladnog sredstva (slika 2b) rezultiralo je povećanjem kapaciteta postrojenja za isti broj pogonitelja i kompresora. Za razlikovanje procesa u odnosu na prije primjenjivani, proces se u literaturi susreće pod nazivom C3MR/SplitMR (Brimm et al., 2006; Pillarella et al., 2007). Maksimalni kapacitet pojedine jedinice za ukapljivanje kod primjene ove modifikacije procesa je $4,7 \times 10^6$ t/god, dok je kapacitet jedinice kod prije opisanog sustava bio $3,3 \times 10^6$ t/god (Brimm, 2006).

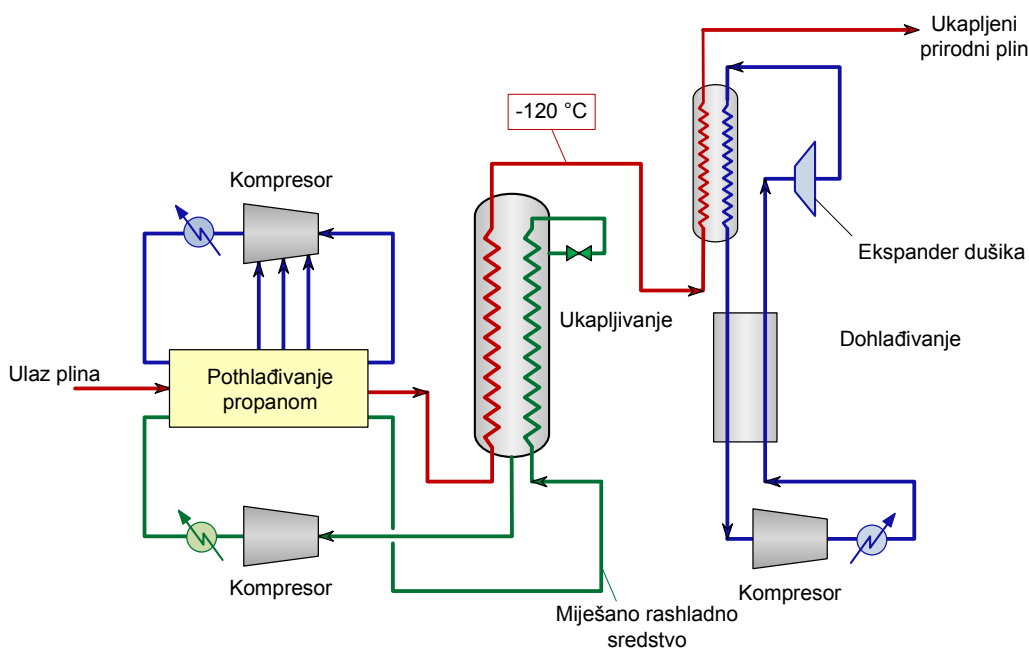


Slika 2. Razlika između C3MR i C3MR/Split procesa (Pillarella et al., 2007)
 Figure 2 Difference between C3MR and C3MR/Split Process (Pillarella et al., 2007)

AP-X proces

Modifikacija procesa s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom nazvana AP-XTM proces omogućila je dodatno povećanje kapaciteta postrojenja za ukapljivanje. Poboljšanje predstavlja razdvajanje ciklusa ukapljivanja i dohlađivanja plina odnosno uvođenje trećeg ciklusa u kojem se u procesu dohlađivanja plina, kao rashladno sredstvo koristi dušik (slika 3). Dodavanjem ovog ciklusa smanjuje se opterećenje na opsluživanje miješanim rashladnim

sredstvom na oko 60%, zbog čega je moguće ostvariti kapacitet jedinice postrojenja od 8×10^6 t/god (Pillarella et al., 2005; Pillarella et al., 2007). AP-X proces primjenjuje se na tri jedinice za ukapljivanje u Kataru. Četvrta jedinica je u fazi izgradnje i očekuje se njezino puštanje u rad početkom 2010. godine. Isti proces planira se primijeniti i na dvije jedinice koje se namjeravaju graditi tijekom 2010. i 2011. godine. Predviđa se da će tijekom 2013. godine proizvodnja ukapljenog plina u Kataru doseći 77×10^6 t/god (www.petroleum-economist.com, 2009).



Slika 3. AP-X proces ukapljivanja prirodnog plina (Pillarella et al., 2007)
Figure 3 AP-X natural gas liquefaction process (Pillarella et al., 2007)

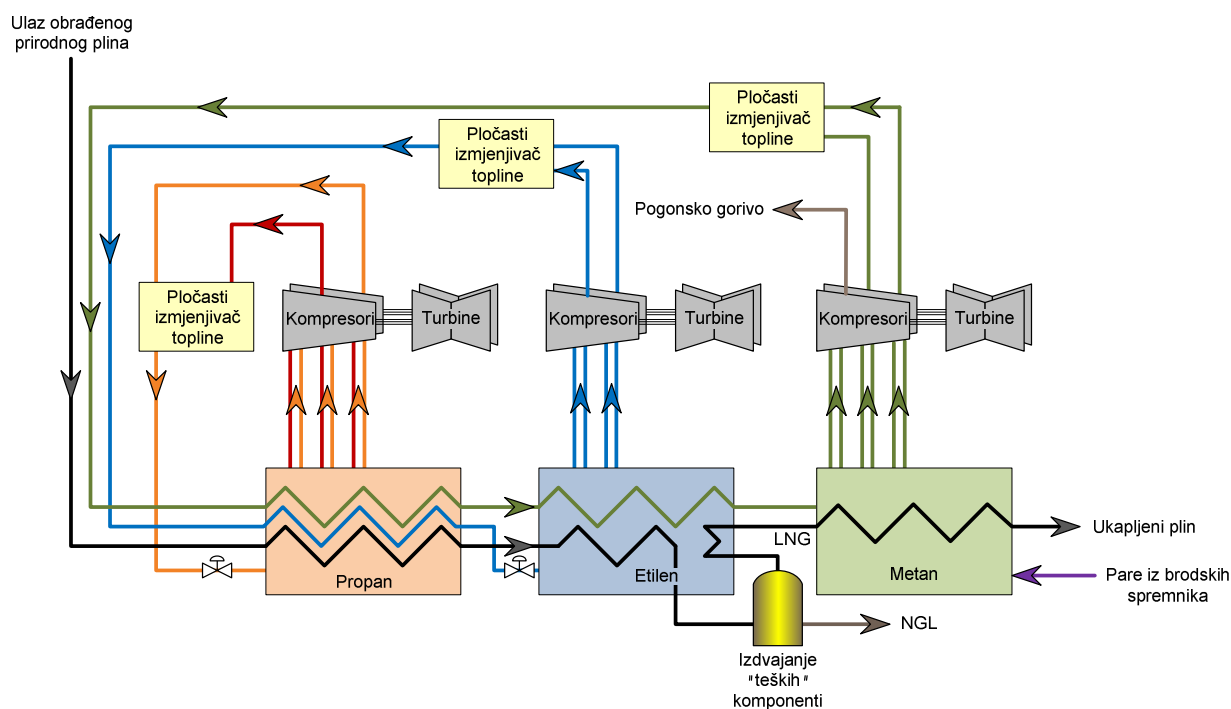
Optimizirani kaskadni proces

Kompanija Phillips Petroleum (danas ConocoPhillips) razvila je šezdesetih godina prošlog stoljeća kaskadni proces ukapljivanja prirodnog plina. Proces je prvi puta primijenjen 1969. godine na Kenai postrojenju za ukapljivanje na Aljaski. Slika 4. prikazuje shemu tipičnog kaskadnog procesa kakav se danas primjenjuje, a predstavlja optimizirani proces u odnosu na onaj primijenjen na postrojenju na Aljaski (Andress, 1996; Andress et al., 1997).

Kod ovog procesa se u svakom od tri ciklusa hlađenja prirodnog plina koriste jednokomponentna rashladna sredstva i to propan, etilen i metan. Sustavi hlađenja propanom i etilenom su dva odvojeno - zatvorena sustava hlađenja, dok je hlađenje metanom otvoreni sustav koji dozvoljava veliki ulazni volumen metana. Metanski sustav podrazumijeva isparavanje kondenzirane struje pod visokim tlakom kroz određeni broj koraka smanjenja tlaka s tim da se u svakom koraku ispareni sastojci stlačuju i vraćaju u cirkulaciju.

Plin očišćen od primjesa, ulazi pod visokim tlakom u izmjenjivač topline gdje se predohlađuje propanom kroz nekoliko koraka. Većina ugljikovodika veće molekularne mase izdvaja se iz struje plina. Kondenzat se izdvaja i skladišti, dio izdvojenog propana skladišti se i koristi za pripremu rashladnog sredstva, a ostale frakcije se ponovo utiskuju u plin i zajedno s njim ukapljuju.

Nakon izdvajanja težih frakcija, plin se hladi etilenom. Struja u izmjenjivaču topline potpuno kondenzira, a struja vraćena u proces iz kompresora metana hladi se na isti način. Pare iz svakog isparivača propana ulaze u kompresor. Nakon stlačivanja se hlade i kondenziraju pomoću zraka ili vode, te se ponovno vraćaju u krug za hlađenje plina. Pare etilena se zagrijavaju na temperaturu okoline, a nakon toga ulaze u kompresor. Etilen koji pod visokim tlakom izlazi iz kompresora hladi se pomoću zraka ili morske vode, ali i kroz tri stupnja hlađenja propanom dok potpuno ne kondenzira.



Slika 4. Optimizirani kaskadni proces (Huang et al., 2007)
 Figure 4 *Optimized Cascade Process* (Huang et al., 2007)

Ukapljeni plin i struja recikliranog metana pri temperaturi od -90°C izlaze iz etilenskog isparivača, a iz nje se uslijed smanjenja tlaka izdvaja dušik. Kapljiva faza (ukapljeni plin) ulazi u spremnik, a pare odvojene u procesu se zagrijavaju i ulaze u kompresor u metanskom ciklusu. Dio para odvojen u dijelu procesa kojeg karakterizira srednji tlak koristi se kao pogonsko gorivo. U procesu se koriste pločasti izmjenjivači topline koji su smješteni u rashladnu komoru (engl. cold box).

Primjenom kaskadnog procesa ukapljivanja najveći kapacitet po jedinici za ukapljivanje od $5,2 \times 10^6$ t/god ostvaren je na četvrtoj jedinici postrojenja za ukapljivanje Atlantic LNG u Trinidadu i Tobagu (Diocee et al., 2004). Proces se razvija i optimizira s ciljem povećanja kapaciteta (do $7,2 \times 10^6$ t/god po jedinici za ukapljivanje).

Kaskadni proces s miješanim fluidima

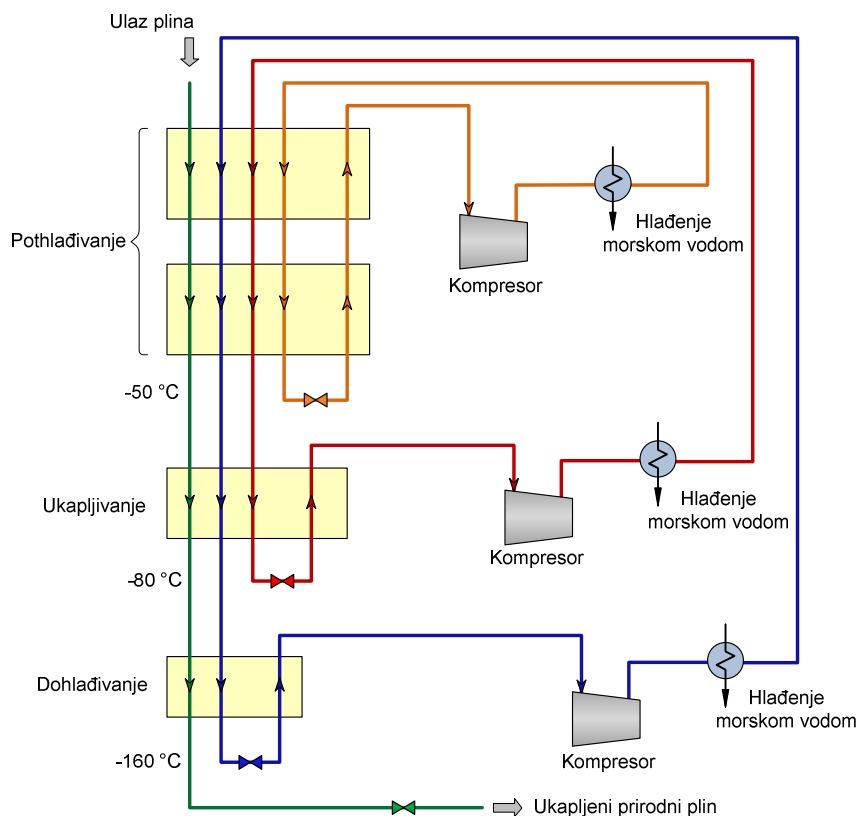
Kompanije Statoil i Linde su se ujedinile radi razvoja procesa za ukapljivanje prilagođenog za rad na Sjevernom moru (Snohvit projekt, Ekofish, Norveška). Suradnja je rezultirala razvojem tzv. "kaskadnog procesa ukapljivanja s miješanim fluidima" (engl. Mixed Fluid Cascade Process - MFC Process) koji se u literaturi često naziva i Linde proces (slika 5). Prethodno očišćeni prirodni plin ukapljuje se u tri odvojena rashladna ciklusa s miješanim rashladnim sredstvima čiji je sastav prikazan u tablici 1 (Heiersted et al., 2001).

Tablica 1. Sastav rashladnog sredstva u Linde procesu ukapljivanja
 Table 1 *Composition of Linde process mixed refrigerant*

	Propan, %	Etan, %	Metan, %	Dušik, %
Predhladenje	~60	~28	~10	~2
Ukapljivanje	~3	~12	~80	~5
Dohlađivanje	~7	~10	~80	~3

U ciklusu pothlađivanja prirodni plin se hladi pomoću prvog miješanog rashladnog sredstva u dva pločasta izmjenjivača topline, a u ciklusu ukapljivanja i u ciklusu dohlađivanja pomoću druga dva rashladna sredstva u dva spiralna izmjenjivača topline. Tri rashladna kompresorska sustava mogu imati odvojene ili integrirane pogone.

Kaskadni proces s miješanim fluidima je klasičan kaskadni proces s tom razlikom da rashladni ciklusi s miješanim rashladnim sredstvom zamjenjuju rashladne cikluse s rashladnim sredstvom s odvojenim komponentama poboljšavajući tako termodinamičku djelotvornost i upravljačku fleksibilnost. Kapacitet Snohvit postrojenja iznosi $4,1 \times 10^6$ t/god (Bosma, Nagelvoort, 2009).



Slika 5. Kaskadni proces s miješanim fluidima
Figure 5 Mixed Fluid Cascade Process

Proces s dva miješana rashladna sredstva

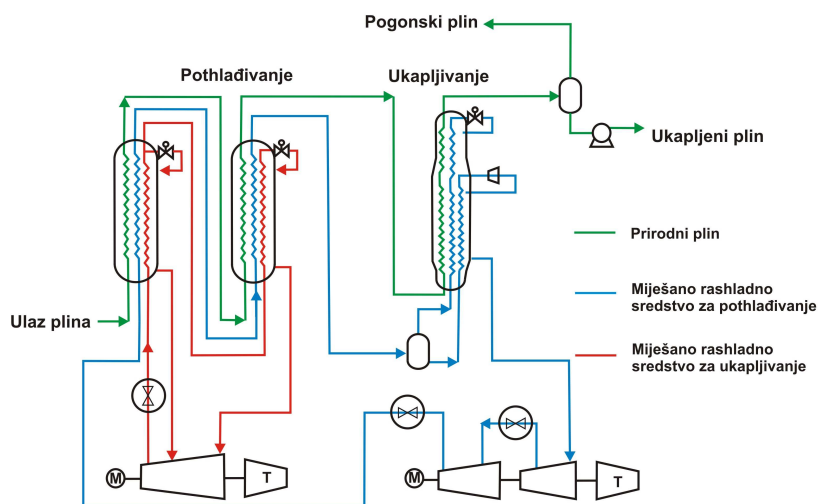
Kompanija Shell je razvila proces ukapljivanja s dva miješana rashladna sredstva (engl. Dual Mixed Refrigerant Process - DMR Process). Kao što je prikazano na slici 6, proces podrazumijeva dva ciklusa s dva miješana rashladna sredstva. U ciklusu pothlađivanja plina primjenjuje se rashladno sredstvo koje je mješavina etana i propana, a u ciklusu ukapljivanja i dohlađivanja plina rashladno sredstvo koje je mješavina, metana, etana, dušika i propana. Oba ciklusa odvijaju se u spiralnim izmjenjivačima topline.

U ciklusu pothlađivanja plin i miješano rashladno sredstvo, koje se koristi u ciklusu ukapljivanja i dohlađivanja, hlade se na temperaturu od oko -50°C . Para miješanog rashladnog sredstva iz izmjenjivača za

pothlađivanje usmjerena je preko separatora u dvostupanjski centrifugalni kompresor. Rashlađivanje, kondenzacija i dohlađivanje rashladnog sredstva postiže se zračnim hlađenjem.

Ciklus ukapljivanja i dohlađivanja prirodnog plina sličan je onom kod C3MR procesa, ali je temperatura plina na ulazu u glavni izmjenjivač topline niža upravo zbog načina pothlađivanja. Miješano rashladno sredstvo primijenjeno u ovom ciklusu stlačuje se pomoću dva serijski spojena kompresora. Nakon toga se hladi i djelomično ukapljuje u ciklusu pothlađivanja prirodnog plina.

Proces se primjenjuje za ukapljivanje prirodnog plina na postrojenju Sahalin II u Rusiji. Za ukapljivanje se koriste dvije jedinice svaka kapaciteta $4,8 \times 10^6$ t/god.



Slika 6. Proces s dva miješana rashladna sredstva
Figure 6 Dual Mixed Refrigerant Process

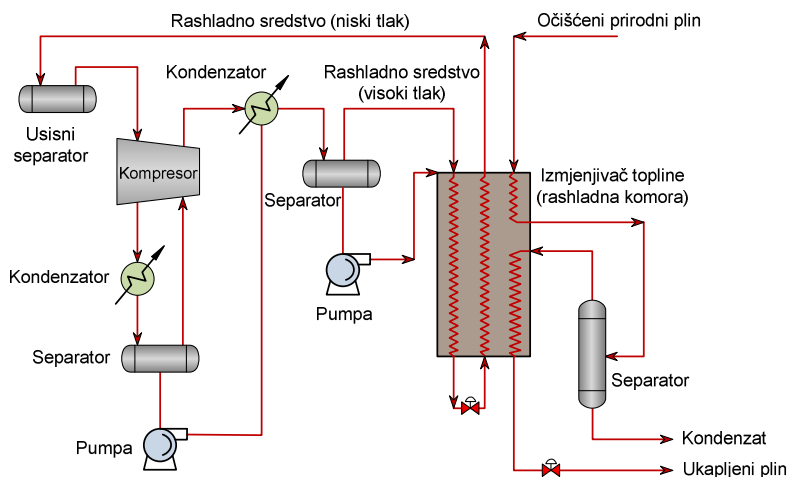
Shell je s ciljem povećanja kapaciteta postrojenja za ukapljivanje razvio i tzv. paralelni proces s miješanim rashladnim sredstvom (engl. Parallel Mixed Refrigerant Process). Proces obuhvaća ciklus pothlađivanja plina i dva paralelna ciklusa ukapljivanja s miješanim rashladnim sredstvom. U ciklusu pothlađivanja kao rashladno sredstvo može se koristiti propan ili miješano rashladno sredstvo. Na ovaj način kapacitet jedinice za ukapljivanje može se povećati do 8×10^6 t/god (Buijs, et al., 2005).

PRICO® process

Kompanija Black and Veatch Pritchard razvila je proces ukapljivanja prirodnog plina koji karakterizira jedan rashladni ciklus s miješanim rashladnim sredstvom u literaturi poznat pod nazivom PRICO proces (engl. Poly Refrigerant Integrated Cycle Operations) (slika 7).

Rashladno sredstvo mješavina je dušika, metana, etana, propana i izo-pentana. Prirodni plin pod tlakom od oko 60 bara i temperaturom od $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulazi u pločaste izmjenjivače topline smještene u rashladnu komoru. Plin se u izmjenjivaču topline ohladi na temperaturu $-155\text{ }^{\circ}\text{C}$, a smanjivanjem tlaka do atmosferskog postiže se temperatura plina od $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nakon stlačivanja, miješano rashladno sredstvo se hladi i kondenzira prije ulaska u separator. Pothlađeno rashladno sredstvo pod visokim tlakom (oko 30 bara) prolazi kroz prigušnicu da bi se dobila dvofazna mješavina koja isparava u glavnom izmjenjivaču topline gdje hladi prirodni plin i zagrijano rashladno sredstvo (Barclay, Shukri, 2000).

PRICO proces omogućuje ukapljivanje oko 2×10^6 t/god plina po jedinici pa je njegova primjena pogodna kod ukapljivanja plina na moru gdje je izgradnja velikih postrojenja znatno složenija nego na kopnu.



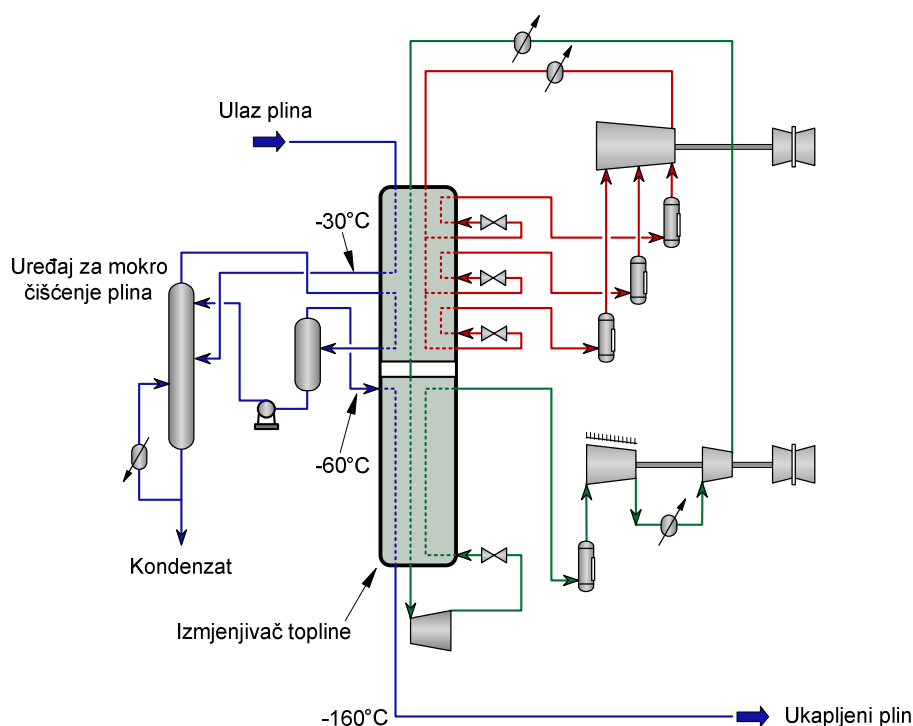
Slika 7. PRICO proces
Figure 7 PRICO Process

Liquefin™ process

Institute Francais de Petrole (IFP) i kompanija Axens razvili su proces za ukapljivanje prirodnog plina koji su nazvali Liquefin proces (slika 8). To je proces sa dva miješana rashladna sredstva. Za pothlađivanje plina koristi se rashladno sredstvo koje je mješavina etana i propana. Rashladno sredstvo isparava kroz tri promjene tlaka i na taj se način u fazi pothlađivanja postiže smanjenje temperature od -50°C do -80°C . Na tim temperaturama miješano rashladno sredstvo može potpuno kondenzirati, čime se izbjegava potreba razdvajanja faza, a uz to se znatno smanjuje i potrebna količina rashladnog sredstva. Uz to se iz plina izdvajaju teže komponente. Drugo miješano rashladno sredstvo

(mješavina dušika, metana, etana i propana) se koristi za ukapljivanje i dohlađivanje plina u procesu. Proces ukapljivanja odvija se u pločastim izmjenjivačima topline (engl. Plate Fin Heat Exchanger – PFHE) smještenim u rashladnu komoru. Dodavanjem izmjenjivača topline u rashladnu komoru i korištenjem pogona kompresora veće snage, kapacitet jedinice za ukapljivanje može biti i do 6×10^6 t/god.

Liquefin proces ima sve pozitivne osobine kaskadnog procesa s mnogo boljom učinkovitošću i s manjim brojem rotirajućih elemenata (Martin et al., 2003; Martin et al., 2004).. Proces do danas nije primijenjen na postrojenjima za ukapljivanje (Tusiani, Sheraer, 2007).



Slika 8. Liquefin™ proces
Figure 8 Liquefin Process

Odabir procesa

Odabir procesa ukapljivanja ima veliki utjecaj na isplativost svakog projekta ukapljivanja budući se radi o ulaganjima većim od milijardu dolara (Barclay, 2005; Festen, Leo, 2009). Postoje kompanije specijalizirane za izradu studije odabira procesa kao dijela projekta ukapljivanja, koje uz to često definiraju i izvedivost raznih faza, analizu ulaznih parametara i kompletni inženjering. Pri odabiru optimalnog procesa takve kompanije kao dodatak vlastitim bazama podataka koriste i podatke dobivene na temelju ostvarenih kontakata s vlasnicima licence procesa ukapljivanja i s

glavnim proizvođačima odnosno dobavljačima opreme. Obično studija odabira procesa započinje definiranjem ulaznih parametara kao što su uvjeti okoliša, sastav plina koji će se ukapljivati i uvjeta pod kojima plin ulazi u proces, odnosno definiranja izlaznih produkata procesa i njihovih svojstva. U suradnji s vlasnikom postrojenja definiraju se njegovi prioriteti u smislu ostvarenja maksimalne proizvodnje, minimalne potrebne snage ili minimalne emisije štetnih tvari. Uz to će studija za pravilan odabir procesa uključivati i razmatranje potrebne opreme, moguće konfiguracije

opreme, količine i vrste rashladnih sredstava, definiranje kapitalnih ulaganja, pogonskih troškova itd. Jasno je da se kao i u svakom drugom području vjerojatnost izbora optimalnog procesa povećava s brojem ulaznih

parametara. Zastupljenost pojedinih procesa u postojećim postrojenjima za ukapljivanje plina prikazana je u tablici 2.

Tablica 2. Zastupljenost procesa za ukapljivanje prirodnog plina u postojećim postrojenjima za ukapljivanje (www.zeuslibrary.com, 2009)

Table 2 Liquefaction process applied in present LNG terminals (www.zeuslibrary.com, 2009)

PROCES UKAPLJIVANJA	VLASNIK LICENCE	BROJ JEDINICA ZA UKAPLJIVANJE	POČETAK RADA	Zastupljenost (%)
Proces s jednim miješanim rashl. sred.	APCI	4	1970	4,5
C3MR proces	APCI	59	1972	66,3
C3MR/Split	APCI/Shell	10	2003	11,4
AP-X proces	APCI	3	2009	3,4
Optimizirani kaskadni proces	Conoco-Phillips	7	1999	8
Kas. proces s miješanim fluidima	Linde-Statoil	1	2006	1,1
Proces sa dva miješ. rashl. sred.	Shell	2	2009	2,3
Prico proces	Black & Veatch	3	2005	3,4
Liquefin proces	IFP/Axens	0	1978	0

Napomena: U tablici su prikazani podaci samo za postrojenja kod kojih je kapacitet jedinice za ukapljivanje veći od 1×10^6 t/god

Zaključak

Podaci o postojećim postrojenjima za ukapljivanje prirodnog plina ukazuju na to da se do 2000. godine kapacitet postrojenja stalno umjereno povećavao. Danas su kapaciteti ukapljivanja definirani učinkovitošću procesa odnosno razinom razvoja tehnologije što je rezultiralo većim rasponom ostvarivih kapaciteta pojedinog postrojenja. Budući da kapacitet postrojenja uz razvoj tehnologije ovisi i o trenutnoj i budućoj proizvodnji prirodnog plina kao i tržištu plina, jasno je da daljnje povećanje kapaciteta nema previše smisla. Zato se inovacije u razvoju tehnologije koncentriraju na bolju učinkovitost procesa, ekonomičnost u smislu izdvajanja tekućih goriva, smanjenje emisija štetnih plinova, a u konačnici i na kapacitet postrojenja.

Rad je izrađen u okviru projekta 195-1951390-1397 "Razvoj i primjena novih tehnologija pri izradi i opremanju bušotina", koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

Accepted: 29.10.2009.

Received: 15.09.2009.

Literatura

Andress, D.L. (1996): The Phillips Optimized Cascade LNG Process; A Quarter Century of Improvements, Institute Gas Technology, Des Plaines, Illinois, USA, 1996.

Andress, D.L., Sandison, G.T., Ryan, D., Oliver, J.D., Krusen, L.C. (1997): Recent Developments in LNG Technology, SPE 15th World Petroleum Congress, Beijing, China, October 12 - 17, 1997.

Bosma, P., Nagelvoort, R. K. (2009): Liquefaction Technology; Developments through History, Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium, 10-12 January, 2009.

Barclay, M. (2005): Natural Gas Liquefaction Process Selection for Emerging Markets, 5th Doha Conference on Natural Gas, Doha, Qatar, March 2, 2005.

Barclay, M., Shukri, T. (2000): Enhanced single mixed refrigerant process for stranded gas liquefaction, 79th Annual GPA Convention, Atlanta, March 2000.

Brimm, A., Ghosh, S., Hawrysz, D.J. (2006): Operating Experience With the Split MR Machinery Configuration of the C₃MR LNG Process, SPE Projects, Facilities Constructions, Richardson, Texas, June 2006.

Buijs, K., Pek, B., Nagelvoort, R. (2005): Shell's LNG Technology for 7 - 10 Mtpa LNG Trains, paper IPTC 10681 presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 21-23 November 2005.

Diocee, T. S., Hunter, P., Eaton, A., Avidan, A. (2004): Atlantic LNG Train 4 „The World's Largest LNG Train, LNG 14, Doha, Qatar, March, 2004.

Festen, L., Leo, J. (2009): Choices for LNG FPSO's, paper OTC 19884 presented at the 2009 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 4-7 May 2009.

Heiersted, R.S., Jensen, R.E., Pettersen, R.H., Lillesund, S. (2001): Capacity and Technology for the Snøhvit LNG Plant, LNG 13 Conference, Seoul, May 2001.

Huang, S., Chiu, C., Elliot, D. (2007): LNG: Basics of Liquefied Natural Gas, The University of Texas, Austin, USA, 2007.

- Martin, P-Y., Pigourier, J., Boutelant, P. (2003): Liquefin™: An Innovative Process to Reduce LNG Costs, 22nd World Gas Conference, Tokyo, Japan, 2003.
- Martin, P-Y., Pigourier, J., Fischer, B. (2004): LNG Process selection, no easy task, Hydrocarbon Engineering, Palladian Publications, Farnham, UK, May, 2004.
- McIntosh, S. A., Noble, P. G., Ramlakhan, C. D. (2008): Moving Natural Gas Across Oceans, Oilfield Review, Richardson, Summer 2008.
- Mokhatab, S., Economides, M. J. (2006): Process Selection is Critical to Onshore LNG Economics. World Oil, February, 2006.
- Pek, B.J.J., Sander, K., Wiveka, E. (2007): Big and Clean – A Novel Design for LNG Plants, paper IPTC 11637 presented at the International Petroleum Technology Conference, Dubai, UAE, 4-6 December 2007.
- Pillarella, M., Bronfenbrenner, J. C., Liu, Y., Roberts, M. (2005): Large LNG Trains: Developing the Optimal Process Cycle, Gastech 2005 Conference & Exhibition, Bilbao, Spain, March 14, 2005.
- Pillarella, M., Liu, Y., Petrowski, J., Bower, R. (2007): The C3MR Liquefaction cycle: Versatility for a FastGrowing, Ever Changing LNG Industry, Fifteenth International Conference on LNG, Barcelona, Spain, April 2007.
- Shukri, T. (2004): LNG Technology Selection, Hydrocarbon Engineering, Vol 9, Palladian Publications, Farnham, UK, February 2004.
- Tusiani, D. M., Shearer, G. (2007): LNG: Nontechnical Guide, PennWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, USA, 2007.
- Van de Graaf, J.M., Pek, B. (2005): Large Capacity LNG Trains, The Shell Parallel Mixed Refrigerant, Process, LNG Review, October, 2005.
- Vrzić, V. (2008): Procesi ukapljivanja prirodnog plina, Završni rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2008.
- Wood, D., Mokhatab, S., Economides, M. J. (2007): Offshore Natural gas Liquefaction Process and Development Issues, SPE Projects, Facilities_Constructions, Richardson, Texas, December 2007.
- www.zeuslibrary.com/Well/export, October 2009.
- www.petroleum-economist.com, October 2009. /Qatar limits LNG project delays and proves AP-X technology/