

DOĞAL GAZIN SIVILAŞTIRILMASINDA KULLANILAN KLASİK KASKAD SOĞUTMA SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

*Salih COŞKUN**

Özet: Doğal gazın temininde doğal gazın sıvılaştırması işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Sıvılaştırılan doğal gazın hacmi küçülmekte, kolaylıkla depolanabilmektedir. Bu sayede boru hattı ile taşımının mümkün olmadığı, özellikle deniz aşırı ülkelere rahatlıkla ulaşılabilmektedir. Bu çalışmada, günümüzün önemli bir enerji kaynağı olan doğal gazın sıvılaştırılmasında kullanılan klasik kaskad sıvılaştırma yöntemi incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal gaz sıvılaştırma, Kaskad çevrimi.

Mathematical Analysis of Classic Cascade Cooling Cycle Using in Liquefaction of Natural Gas

Abstract: Liquefaction of natural gas has very important place in available of natural gas. If the natural gas liquified then its volume decreases therefore it can be stored easily in this condition. When it's not possible to convey it by pipe line, by the liquefaction process it can be transported especially to oversea countries. In this study we investigated classic cascade cooling cycle using in liquefaction of natural gas.

Keywords: Natural gas, Liquefaction, Cascade cycle.

Semboller

h	: Entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	: Debi (kg/s)
N	: Güç (kW)
\dot{Q}	: Birim zamanda ısı geçişi (ısı gücü), kW
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
ΔP	: Basınç kaybı (Pa)
η	: Verim

Alt İndisler:

$\ç$: Çıkış
DG	: Doğal gaz
E	: Etilen
g	: Giriş
i	: İç
K	: Kompresör
M	: Metan
P	: Propan
po	: Pompa
s	: Soğutucu akışkan

* Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu.

1.GİRİŞ

Yaygın kullanım alanı bulunan doğal gaz, atmosferik basınçta -161°C 'nin altında soğutulduğu zaman sıvılaşmakta ve sıvı fazına geçtiğinde hacmi 600 kat küçülmektedir. Bunun sonucunda da doğal gaz, özel olarak tasarlanmış tankerlerle deniz aşırı ülkelere rahatlıkla taşınabilmektedir. Çünkü boru hatlarıyla doğal gazı taşımak, özellikle deniz aşırı ülkelere taşımak her zaman mümkün olamamaktadır. Coğrafi koşullar buna müsaade etmemektedir. Doğal gaz tankerlerle taşındıktan sonra, taşınan limanda tekrar gaz fazına geçirilerek kullanım şebekelerine sunulmakta veya sıvı halde ileride kullanılmak üzere depolanmaktadır. Sıvılaştırılmış doğal gazın tipik özellikleri şunlardır:

- * Renksizdir.
- * Kokusuzdur.
- * -161°C 'de 1013 mbar basınçtır.
- * Yoğunluğu 460 kg/m^3 'tür.
- * Üst ısıl değeri $25,2 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3 = 6,03 \times 10 \text{ kcal/m}^3$ 'tür.
- * Buharlaştırma ısısı $501,6 \text{ kJ/kg} = 120 \text{ kcal/kg}$ 'dir.

Doğal gazın sıvılaştırılması bize çok çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bunları şöyle sıralayabiliriz.

a) Doğal gazın sıvılaştırılması sırasında tümünden arıtılması gereklidir. Bu sebepten dolayı temiz bir yakıttır.

b) Boru hattı ile doğal gaz taşınmasındaki mesafe ve coğrafi sınırlar sıvılaştırılmış doğal gaz taşımacılığında önemli değildir. Günümüzde Cezayir'den A.B.D'ye, Japonya'ya sıvılaştırılmış doğal gaz nakledilmektedir. Aynı nakliye işlemini doğal gaz boru hattı ile yapmak mümkün olmamaktadır.

c) Boru hattı ile doğal gaz taşımacılığında çoğu kez boru hattının çok ve çeşitli ülkelerden geçmesi gerekirken, sıvılaştırılmış doğal gaz'da böyle bir problem yoktur.

d) Doğal gaz kullanan ülke, boru hatları ile taşımacılığa karşın komşu ülkelerden geçen boru hattı dışında alternatif bir arz kaynağına sahip olabilmektedir.

e) Sıvılaştırılmış doğal gaz depoları, doğal gazın depolanmasına belirli sınırlarda alternatif olabilmektedir.

f) Doğal gazın sıvılaştırılması işlemleri büyük yatırım gerektirir. Bu, gazın fiyatının artmasına neden olurken, alternatif yeni kaynak bulma ve gaz depolaması yönünden önemli yarar sağlar.

Günümüzde doğal gaz sıvılaştırma teknolojisi teknik emniyette dahil olmak üzere kendisini ispatlamıştır. Gelişmiş doğal gaz sistemlerine sahip ülkeler doğal gaz kaynaklarını çeşitlendirmekte ve gelişen müşterilerinin doğal gaz tüketimindeki sürekliliğini güvence altına almaktadırlar.

2. DOĞAL GAZ SIVILAŞTIRMA METOTLARI

Kullandığımız doğal gaz, rezervlerine bağlı olarak metan dışında, su buharı, CO_2 , H_2S ve ağır hidrokarbonlar içerir. Sıvılaştırılması düşünülen doğal gazın (metan) öncelikle bu yabancı gazlardan arındırılması yada seçilen sıvılaştırma yöntemlerine bağlı olarak kabul edilebilir konsantrasyonlara düşürülmesi gerekir. Bilinen yöntemlerden biri ile doğal gaz saflaştırıldıktan sonra ikinci kademe sıvılaştırma işlemine tabi tutulur.

Bir doğal gaz sıvılaştırma tesisinde toplam maliyetin en büyük kısmı (%40-45) doğal gaz sıvılaştırma ünitesine aittir. Diğer kısmı ise sistemin saflaştırma, depolama, geliştirme, personel, iletim ve dağıtım gibi kısımlarda kullanılır. Sıvılaştırma ünitesinin fazla maliyeti nedeniyle sıvılaştırma üzerinde daha yoğun araştırmalar yapılmış ve sonuçta bir çok sıvılaştırma yöntemi geliştirilmiştir. Bunların bir kısmı pratik uygulama alanı bulmuş, bir kısmı ise teorik bazda kalmıştır. Esas itibarıyla bunları birkaç şekilde sınıflamak mümkünse de, burada üç ana grupta sıvılaştırma yöntemleri incelenecek ve bazı özellikleri üzerinde durulacaktır.

Doğal gaz ve benzeri bazı gazların 1 bar veya orta basınç seviyelerinde çığ nokta sıcaklıkları oldukça düşüktür. Böyle bir gazın sıcaklığının düşürülebilmesi için iç enerjinin kullanılması yada ısı geçişi ile enerjinin çevreye geçmesi gerekecektir. Bu amaçla gaz sürekli sıkıştırılarak, mümkünse yoğunlaştırulabilmesi sağlanabilir. Doğal gaz bu şekilde sıvılaştırılmak istenirse ortam sıcaklığında basıncın 1200 bar'ın üzerine çıkarılması gerekir ki bu yol pratik açıdan uygun değildir. Ya da Joule-Thompson etkisinden yararlanarak gazın bir lülede genişletilmesi ile gaz sıcaklığı düşürülerek sıvılaştırma sağlanabilir.

Doğal gaz için 1 bar basınçta çığ noktası -161°C olup sıvılaştırma için doğal gazın sıcaklığının en az bu sıcaklığa kadar düşürülmesi gerekir. Bu amaçla kullanılacak eşanjör ve makinelerin verimleri ile ekonomiklik göz önüne alındığında $60-90^{\circ}\text{C}$ üzerindeki sıcaklık farklarında tek kademeli soğutma yapmak uygun değildir. Dolayısıyla kademeli soğutma yapmak gerekmektedir. Bir gazın sıvılaşabilmesi için onun çığ noktası sıcaklığı altına düşmek gerekmektedir. Pratikte ucuz olduğundan soğutma amacıyla ya çevre havası yada su kullanılır. Ortam sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda evaporatif soğutma söz konusudur. Sıcaklık farkı büyüdüğünde bu işlem kademeli olarak yapılır. Pratikte kullanılan doğal gaz sıvılaştırma sistemleri üç ana grupta toplanabilir.

2.1 Kaskad Soğutma Sistemleri

2.1.1. Klasik Kaskad Soğutma Sistemleri:

Soğutma amacıyla kademeli soğutma yapılan ve her kademede ayrı akışkan ve ayrı devrenin kullanıldığı sistemdir. Her bir akışkan ayrı bir kapalı devre şeklinde tek kademeli yada birkaç kademeli olarak uygun sıcaklık ve basınç aralığında çalışır. Akışkan grubu olarak üçlü kademede sırasıyla propan-etilen-etan, amonyak-etilen-metan veya freon-22- freon-13-metan soğutucu akışkan gruplarından biri seçilebilir. Akışkan grubunun seçilmesiyle, diğer çalışma parametreleri hemen hemen belirlenmiş demektir. Klasik kaskad soğutma sistemleri daha çok ilk kurulan doğal gaz sıvılaştırma sistemleridir. Bugün birçok ülkede hala yaygın olarak kullanılan bu sistem, diğerlerine nazaran daha pahalıdır.

2.1.2. Karışık Akışkanlı Kaskad Soğutma Sistemleri:

Klasik kaskad sistemlerinde gerek ayrı kapalı devreler ve gerekse kompresörlerin fazlalılığı gibi maliyet arttırıcı sistemlerin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilen sistemlerdir. Soğutmanın kademeli yapıldığı ancak soğutma amacıyla kullanılan farklı akışkanların karışmış olarak bulunduğu soğutma sistemleridir. Bu sistemlerde, soğutma için kullanılan akışkanlar karışım halinde bir kompresörde sıkıştırılır ve her bir akışkan kendi çığ nokta sıcaklığında ısı çekerek soğutma yapar. Bu tür sıvılaştırma sistemlerinde yatırım maliyeti daha düşüktür. Sistem farklı akışkanlar kullanma özelliğine sahiptir. Soğutma şartlarına kendini daha kolay adapte eder. Daha düşük birim güç maliyetine ulaşmak mümkündür. Daha yaygın kullanım alanına sahiptir. Tek kompresör ve eşanjör grubuyla bu sistemlerde ulaşılabilecek kapasite, klasik kaskad sistemlerine göre daha düşüktür.

2.1.3. Tek Akışkanlı Kaskad Soğutma Sistemleri:

Tek akışkanlı kaskad soğutma sistemlerinde ya doğal gaz dışında bir soğutucu akışkan yada soğutucu gaz olarak da doğal gaz kullanılır. Bu tür kaskad çevrimi açık çevrim olarak da adlandırılır. Soğutma amacıyla doğal gaz kullanılıyorsa tek kompresör yeterlidir. Ancak farklı akışkan kullanıldığında ikinci bir kompresör kullanılabilir. Bu sistemin en önemli avantajları; basittirler, tek kompresörde tek akışkanın sıkıştırılması yeterlidir. Fazla kompresör ve eşanjör kullanılmaması nedeniyle fazla enerji sarfiyatı gerektirmez. Sıvılaştırılmış doğal gaz üretimi için bir sınırlama yoktur. Ayrıca kompresör problemi olabilir. Sistem devreye kolay girer ve kolay çıkar.

2.2. Türbinle Genleşme Esaslı Soğutma Sistemleri:

Tek yada çok akışkanlı, kademeli soğutma yapılan genleşmenin türbinde yapıldığı ve alınan işin kullanıldığı soğutma sistemleridir. Kaskad soğutma sistemlerinde kısılma esnasında kullanılabilir enerjinin bir kısmı tersinmezliklere harcanarak kaybedilmektedir. Bunun yerine iç enerjinin faydalı hale dönüştürülerek kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla, lüle yerine türbin kullanılmak suretiyle genleşme sağlanabileceği ve bu yolla elde edilen işin kullanılarak kompresörlerin çalıştırılabileceği ve sonuçta sistemin veriminin artacağı düşünülmüştür. Bu sistem diğerlerine nazaran daha esnek ve daha basittir. Eşanjör, faz ayırıcı, valf gibi elemanlar daha azdır. Kullanım alanı yaygınlaşmaktadır.

2.3 Stirling Çevrimi Esaslı Soğutma Çevrimleri:

Sıvının buharlaşması ile düşük sıcaklıkta çekilen ısının sıkıştırma ve sıvılaşma ile yüksek sıcaklıkta atılması şeklinde gerçekleşir. Verimi arttırmak için bir rejeneratör kullanılır. Bu tür soğutma çevrimleri daha küçük kapasiteli doğal gaz sıvılaştırma sistemlerinde kullanılmaktadır.

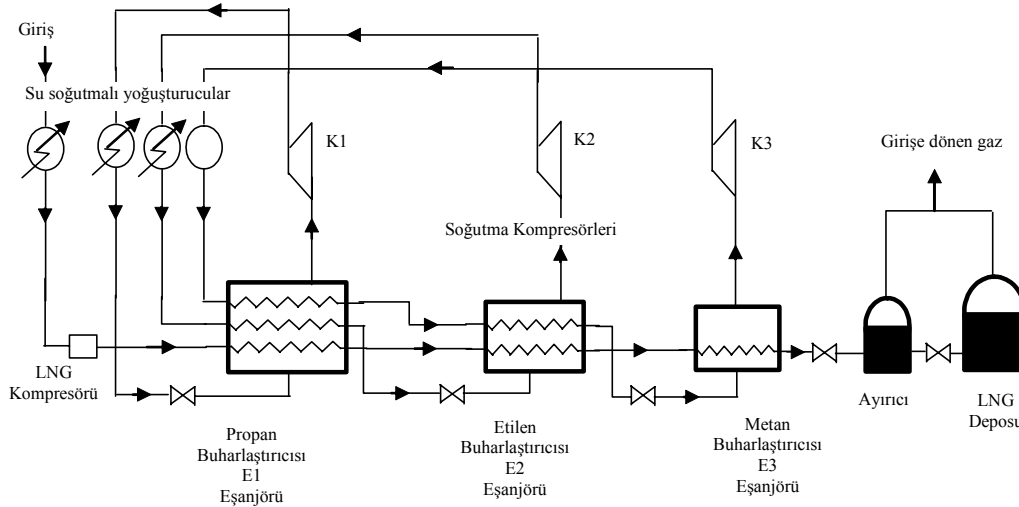
Bir sıvılaştırma sistemi seçilirken bazı kriterler ele alınır. Bu kriterlere bağlı olarak doğal gaz sıvılaştırma sistemi tercih edilir. Bu kriterlerden en önemli olanlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- * Sıvılaştırma sisteminin depolama ünitesine yada taşıma hattına olan uzaklığı
- * Sıvılaştırma sistemi için olan talebin sürekliliği, maksimum ve minimum talep ile uzun süreli talep yükleri
- * Sıvılaştırma sistemi için olan taleplerin kesinlik bakımından güvenilirlik durumları
- * Sıvılaştırma sistemi bileşimi ve düşünülen fiyat
- * Sıvılaştırma sistemi için düşünülen kapasite ve debi
- * Sıvılaştırma sistemi ve gazlaştırma tesislerinin konumu, yer veya bölgenin imkanları.

Bu ana kriterlere ve varsa diğer kısıtlayıcı parametrelerde göz önüne alınarak uygun bir doğal gaz sıvılaştırma sistemi seçilir.

2.4. Klasik Kaskad Sistemleri

Klasik kaskad sistemlerinde soğutucu akışkan olarak birden fazla akışkan kullanılır. Kompresör kapasitesi ve ısı eşanjörlerinin verimi ile yatırım masraflarına bağlı olarak kademe sayısı, akışkan cinsi ve sayısı belirlenir. Her bir akışkan ayrı bir kapalı devre şeklinde tek kademeli yada birkaç kademeli olarak uygun sıcaklık ve basınç aralığında çalışır (Can ve Avcı, 1994). Akışkan grubu olarak üçlü kademeyle sırasıyla propan-etilen-etan, amonyak-etilen-metan veya freon22 - freon13- metan soğutucu akışkan grubu seçilebilir. Akışkan grubu seçildiğinde diğer çalışma parametreleri hemen hemen belirlenmiş demektir (BORGNAKKE ve SONNTAG, 1997). Propan-etilen-metan soğutuculu klasik kaskad devresi için basit bir şema Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.

Klasik kaskad soğutma çevrimi

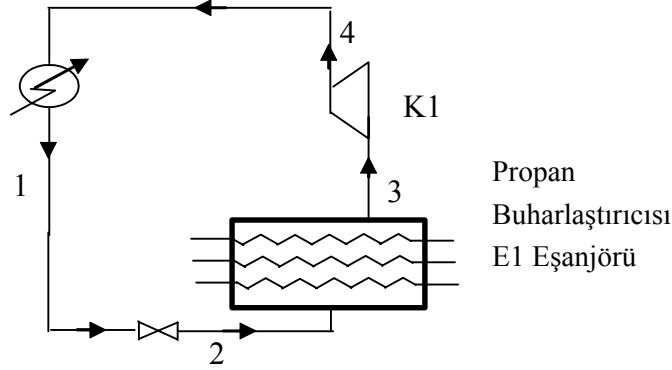
40°C’de ve 4 bar basınçta şehir şebekesinden gelen doğal gaz, yabancı bileşenlerinden ayrıştırılarak 17°C sıcaklıktaki deniz suyu ile ön soğutma yapıldıktan sonra E1 eşanjörüne ulaşır. E1 eşanjöründe propan gazı ile -40°C’ye kadar soğutma yapılmaktadır. E1 eşanjöründe ısı çekerek buharlaşan propan K1 kompresöründe 11 bar basınca kadar sıkıştırılıp su ile soğutulduktan sonra 1 bar basınca kadar kısılarak E1 eşanjörüne döner ve propan çevrimi tamamlanmış olur. 3,5 bar civarında olan doğal gaz E1 eşanjöründe soğuduktan sonra E2 eşanjörüne gelir ve burada etilen çevriminde -100°C sıcaklığa kadar soğur. E2 eşanjöründe etilen bulunmaktadır. Burada ısı çekerek buharlaşan etilen K2 kompresöründe 15 bar basınca kadar sıkıştırılır. Buradan E1 eşanjörüne gelir ve burada ön soğutmaya uğradıktan sonra 1 bar basınca kısılarak E2 eşanjörüne döner ve bu şekilde etilen çevrimi tamamlanmış olur. Doğal gaz E2 eşanjöründe -100°C’ye soğuduktan sonra E3 eşanjörüne gelir. E3 eşanjöründe metan bulunmaktadır. Burada 1 barda 160°C civarında doğal gazdan ısı çekerek buharlaşan metan K3 kompresöründe 25 bar basınca sıkıştırıldıktan sonra propan çevriminde E1 eşanjörüne gelir; çevrimin son kademesinde ön soğutmadan

geçtikten sonra etilen çevrimine gelir. Burada -100°C civarına soğuduktan sonra 1 bar basınca kısılarak E3 eşanjörüne döndürülür. Bu şekilde metan çevrimi tamamlanır. E3 eşanjöründen geçen doğal gaz 1 bar basınca kısıldıktan sonra dengeleme ve depolama tankına gelir. Depolama tankında sıvılaşımayan yada çevreden ısı geçişi nedeniyle yeniden buharlaşan doğal gaz kısmı ise ya geri besleme ile LNG sistemi girişine yada kullanılmak üzere enerji santraline gönderilir. LNG sisteminin enerjisi santralden karşılanıyorsa bu enerji santrali için gerekli doğal gaz miktarı, seçilen sisteme bağlı olarak, toplam gazın %15-20'si civarındadır. Bu tür sistemlerde kullanılan her bir gaz çevrimi bir kaç soğutma kademesini içermektedir.

3. MATEMATİK MODELLEME

Her bir soğutucu devresi için, her bir soğutucu akışkana ait InP-h diyagramlarından yararlanılarak, sistemin belirli noktalarındaki özellikler (sıcaklık, basınç ve entalpi değerleri) tespit edilir (Savaş, 1974).

Propan kullanılan soğutma devresi:



Şekil 2.

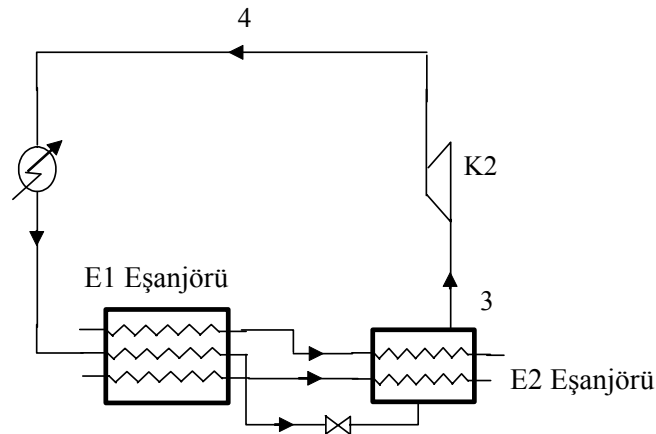
Propan kullanılan soğutma devre şeması

Tablo 1.

Propan kullanılan soğutma devresi basınç-entalpi diyagramından elde edilen değerler

Noktalar	Basınç (bar)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Entalpi (kJ/kg)
1p: Kısıltma vanası girişi	11	25	-1884.05
2p: Buharlaştırıcı girişi	1	-42	-1884.05
3p: Kompresör girişi	1	-42	-1622.3
4sp: Tersinir adyabatik kompresör çıkışı	11	58	-1504.9
4p: Adyabatik kompresör çıkışı	11	66	-1475.25

Etilen kullanılan soğutma devresi:

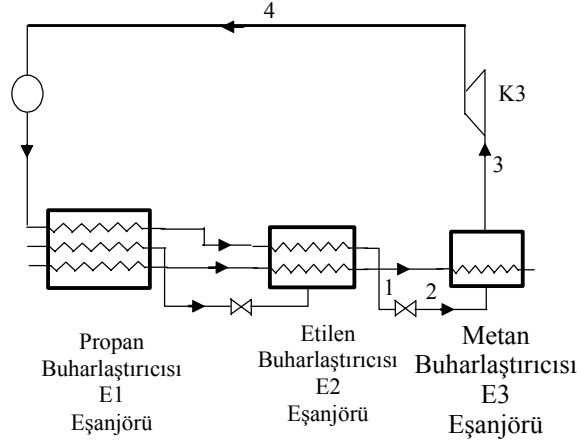


Şekil 3.

Etilen kullanılan soğutma devre şeması

Tablo 2.**Etilen kullanılan soğutma devresi basınç-entalpi diyagramından elde edilen değerler**

Noktalar	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)
1e: Kısılma vanası girişi	15	-42	2039.8
2e: Buharlaştırıcı girişi	1	-105	2039.8
3e: Kompresör girişi	1	-105	2360
4se: Tersinir adyabatik kompresör çıkışı	15	28	2535.3
4e: Adyabatik kompresör çıkışı	15	33	2579.12

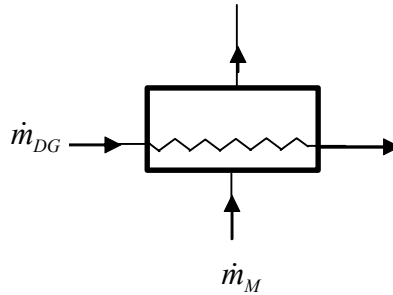
Metan kullanılan soğutma devresi:**Şekil 4.***Metan kullanılan soğutma devre şeması***Tablo 3.****Metan kullanılan soğutma devresi basınç-entalpi diyagramından elde edilen değerler**

Noktalar	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)
1m: Kısılma vanası girişi	25	-105	-65.54
2m: Buharlaştırıcı girişi	1	-162	-65.54
3m: Kompresör girişi	1	-162	222.88
4sm: Tersinir adyabatik kompresör çıkışı	25	0	486.22
4m: Adyabatik kompresör çıkışı	25	5	552.05

Isı eşanjörleri:

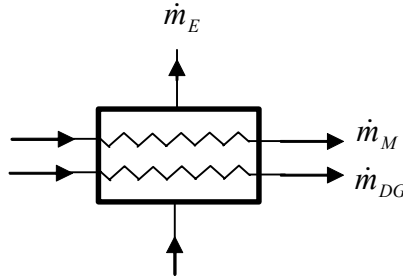
Metan buharlaştırıcısı için termodinamiğin I. kanunu yazılarak soğutucu akışkan metanın aldığı ısı, doğal gazın verdiği ısıya eşitlenir ve metanın debisi bulunur.

$$\dot{m}_M (h_{3_M} - h_{2_M}) = \dot{m}_{DG} (h_{\dot{\zeta}_{DG}} - h_{g_{DG}}) \quad (1)$$

**Şekil 5.***Metan buharlaştırıcısında enerji dengesinin gösterilmesi*

Etilen buharlaştırıcısı için Termodinamiğin I. kanunu yazılarak soğutucu akışkan etilenin aldığı ısı, doğal gaz ve metanın verdiği ısılarla eşitlenir ve etilen debisi bulunur.

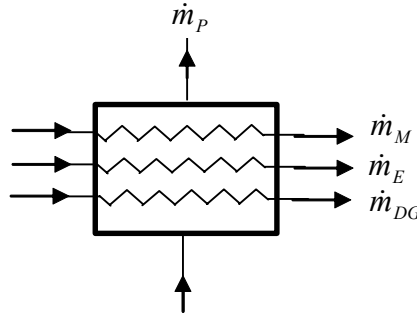
$$\dot{m}_E (h_{3_E} - h_{2_E}) = \dot{m}_{DG} (h_{\zeta_{DGE}} - h_{g_{DGE}}) + \dot{m}_M (h_{\zeta_{ME}} - h_{g_{ME}}) \quad (2)$$



Şekil 6.
Etilen buharlaştırıcısında enerji dengesinin gösterilmesi

Propan buharlaştırıcısı için Termodinamiğin I. kanunu yazılarak soğutucu akışkan propanın aldığı ısı, doğal gaz, etilen ve metanın verdiği ısılarla eşitlenir ve propan debisi bulunur.

$$\dot{m}_P (h_{3_P} - h_{2_P}) = \dot{m}_{DG} (h_{\zeta_{DGP}} - h_{g_{DGP}}) + \dot{m}_E (h_{3_{PE}} - h_{2_{PE}}) + \dot{m}_M (h_{\zeta_{MP}} - h_{g_{MP}}) \quad (3)$$



Şekil 7.
Propan buharlaştırıcısında enerji dengesinin gösterilmesi

Yoğuşturucular:

Yoğuşturucuda Termodinamiğin I. kanun ifadesi yazılarak enerji dengesinden dolaşan su miktarı tespit edilir.

Propan kullanan soğutma devresi: Propanın verdiği ısıyı su alacaktır.

$$\dot{Q}_P = \dot{Q}_{su_P} \quad (4)$$

$$\dot{m}_P (h_{1_P} - h_{4_P}) = \dot{m}_{su_P} C_{p_{su}} (T_{\zeta_{sup}} - T_{g_{sup}}) \quad (5)$$

Etilen kullanan soğutma devresi: Etilen verdiği ısıyı su alacaktır.

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_{su_E} \quad (6)$$

$$\dot{m}_E (h_{1_E} - h_{4_E}) = \dot{m}_{su_E} C_{p_{su}} (T_{\zeta_{SUE}} - T_{g_{SUE}}) \quad (7)$$

Metan kullanan soğutma devresi: Metan için aynı hesapları yapmaya gerek yoktur. Çünkü metanın kompresör çıkış sıcaklığı (5°C), soğutucu suyun giriş sıcaklığından (17°C) küçüktür.

Pompalar:

Propan ve etilen kullanan soğutma sistemleri için kondenserdeki ısıyı almak amacıyla, suyu göndere pompaya güçleri aşağıdaki ifadeyle bulunmaktadır. Metan kullanan soğutma sisteminde ise su dolaştırılmaya gerek olmadığından pompa da kullanılmamaktadır.

$$N_{po} = \frac{\dot{m}_{su} \Delta P}{\rho \cdot \eta_{ipo}} \quad (8)$$

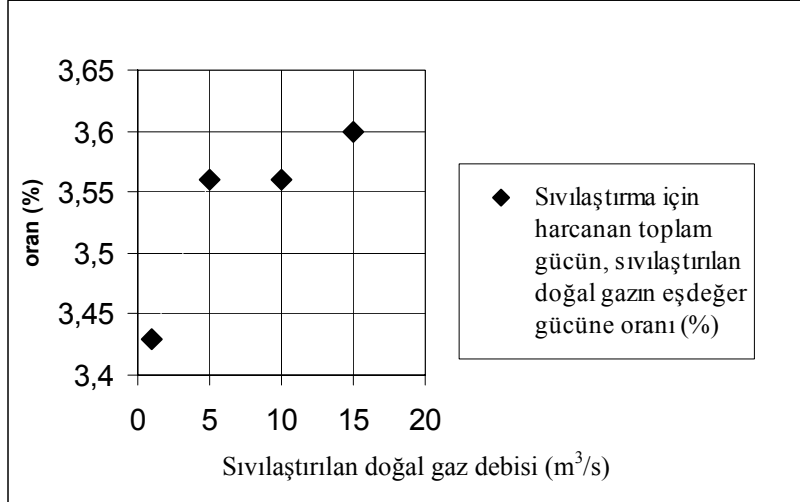
İfadesiyle bulunmuştur.

Kompresör güçleri:

$$N_K = \frac{\dot{m}_s (h_{s_4} - h_{s_3})}{\eta_{IK}} \quad (9)$$

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapılan analiz neticesinde görülmüştür ki; doğal gazın sıvılaştırılması için harcanan toplam güç değeri (pompalar ve kompresörler), sıvılaştırılmış doğal gazın eşdeğer gücü yanında yaklaşık %4 oranında bir değer teşkil etmektedir. Şekil 8’de sıvılaştırılan doğal gaz debisine bağlı olarak sıvılaştırma için harcanan toplam güç ve sıvılaştırılan doğal gazın eşdeğer gücü arasındaki ilişki görülmektedir. Görüldüğü gibi sıvılaştırılan doğal gaz debisi arttıkça harcanan güç ve sıvılaştırılan doğal gazın eşdeğer gücü doğrusal olarak artmaktadır.

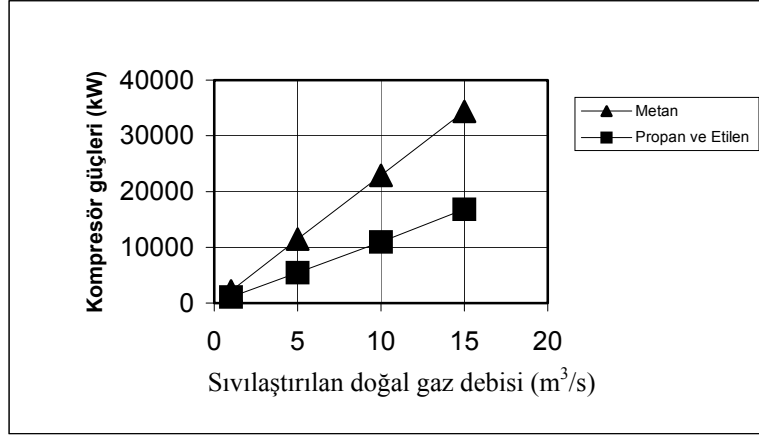


Şekil 8.

Doğal gazın sıvılaştırılması için harcanan gücün sıvılaştırılmış doğal gazın eşdeğer güce oranı

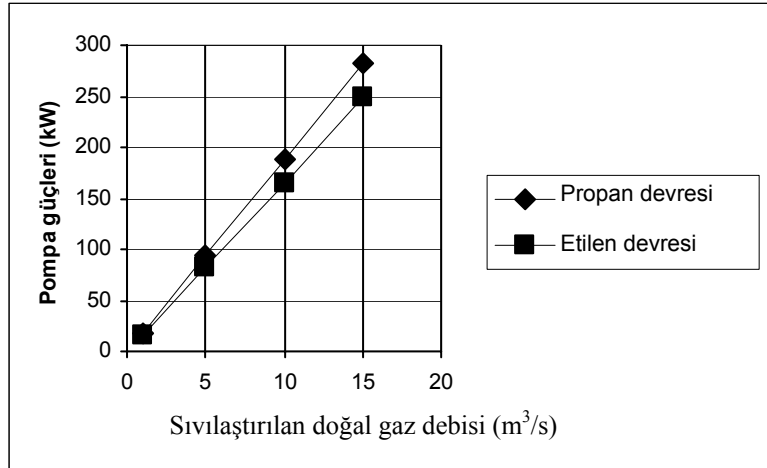
Doğal gazın sıvılaştırılmasında harcanan toplam güçler sistemdeki pompalar ve kompresörler tarafından harcanan güçlerdir. Soğutma sistemlerinde kullanılan kompresörler tarafından tüketilen güç değerleri incelendiğinde, etilen ve propan kullanılan soğutma sistemlerindeki kompresörlerin tükettikleri güç değerleri birbirlerine yakın değerler olup, metan kullanılan soğutma devresindeki kompresör tarafından tüketilen güç değerinden düşüktür. Şekil 9’da doğal gazın sıvılaştırılmasında kullanılan soğutma sistemlerinde harcanan kompresör güçleri görülmektedir. Hacimsel debi başına metan kompresörünün harcadığı güç yaklaşık etilen ve propan kompresörleri tarafından harcanan toplam güç değerlerinin iki katına karşılık gelmektedir.

Doğal gazın sıvılaştırılmasında soğutma sistemlerinde yoğuşturucuların ısısını almak amacıyla kullanılan pompalarının harcadıkları güçler incelendiğinde, Propan kullanılan soğutma devresindeki pompanın çektiği güç değeri, etilen kullanılan soğutma devresindeki pompanın çektiği güç değerine göre daha fazladır. Şekil 10’da pompa güçleri verilmektedir.

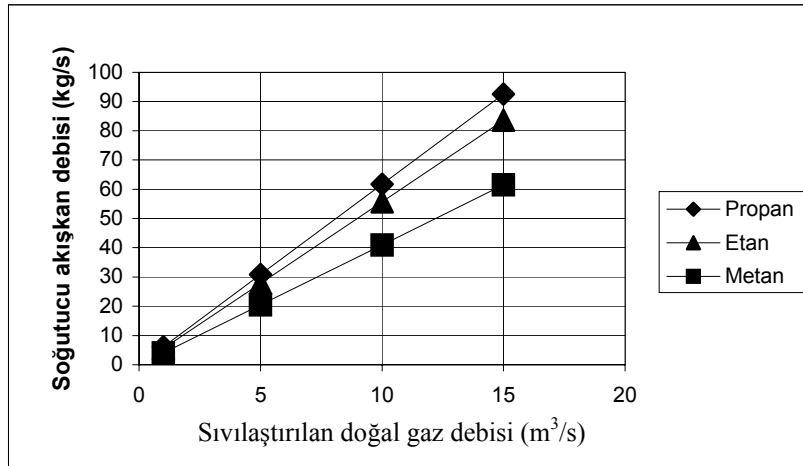


Şekil 9.
Soğutma sistemlerindeki kompresör güçleri

Doğal gazın sıvılaştırılması amacıyla kullanılan soğutma devrelerinde dolaşan soğutucu akışkan miktarları da Şekil 11’de gösterilmektedir. Sıvılaştırılan doğal gaz debisi arttığında soğutma sistemlerinde dolaşan soğutucu akışkan miktarları da artmaktadır. Yapılan analiz neticesinde propan kullanılan soğutma sisteminde en yüksek debide soğutucu akışkan dolaşmaktadır. En az soğutucu akışkan miktarına sahip soğutma sistemi ise metan kullanılan soğutma sistemidir.

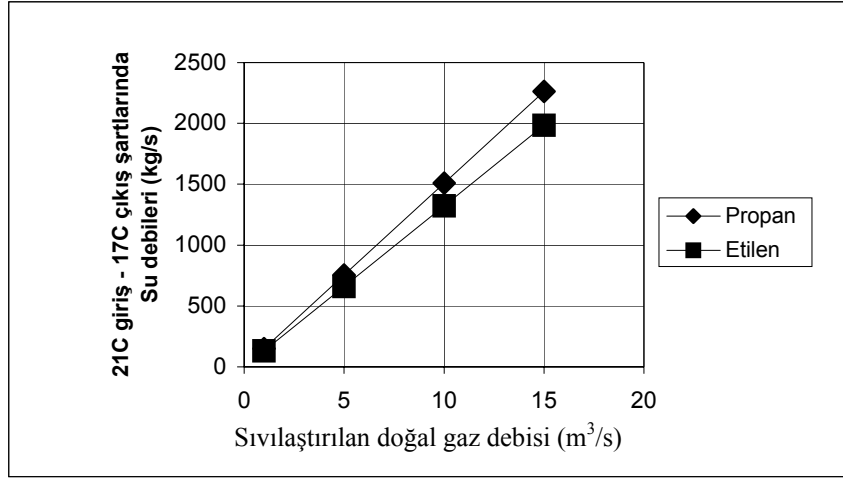


Şekil 10.
Pompa güçleri



Şekil 11.
Soğutma sistemlerinde dolaşan soğutucu akışkan miktarları

Doğal gazın sıvılaştırılmasın da kullanılan soğutma devrelerinde ön soğutma amacıyla sisteme gönderilen su miktarları Şekil 12’de görülmektedir. Propan devresinde kullanılan su miktarı, etilen devresinde kullanılan su miktarına nazaran daha fazladır.



Şekil 12.
Propan ve etilen devrelerinde ön soğutma için gerekli su debileri

Yapılan bu çalışma sonucunda; klasik kaskad metoduyla gerçekleştirilen doğal gaz sıvılaştırma işlemi esnasında harcanan güçler ve sıvılaştırılan doğal gaz debisi için soğutma devrelerinde kullanılan soğutucu akışkan ve su debileri belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre; sıvılaştırma işlemi için kompresörler ve pompalar tarafından harcanan güç, doğal gazın eşdeğer gücü yanında %4 olarak elde edilmiştir. Bu değer kaskad soğutma sisteminin türüne göre %15-20 değerlerine kadar ulaşabilmektedir.

Klasik kaskad soğutma sistemleri ilk kurulan sistemler olmasına karşın, bugün halen USA-Birmingham, Cezayir-Arzew ve Alaska-Kenai tesislerinde kullanılmaktadır. Bugünkü teknolojik seviyede klasik kaskad sıvılaştırma sistemleri diğerlerine nazaran daha pahalı tesislerdir. Bir doğal gaz sıvılaştırma tesisinde toplam maliyetin en büyük kısmı (%40-45) doğal gaz sıvılaştırma ünitesine aittir. Diğer kısmı ise sistemin saflaştırma, depolama, geliştirme, personel, iletim ve dağıtım gibi kısımlarda kullanılır. Sıvılaştırma ünitesinin fazla maliyeti nedeniyle sıvılaştırma üzerinde daha yoğun araştırmalar yapılmış ve sonuçta bir çok sıvılaştırma yöntemi geliştirilmiştir. Bunların bir kısmı pratik uygulama alanı bulmuş, bir kısmı ise teorik bazda kalmıştır.

5. KAYNAKLAR

1. BORGNAKKE, I Ve SONNTAG, R.E. (1997). Thermodynamic and Transport Properties. John Wiley and Sons Press, London. P. 62-78.
2. CAN, M. ve AVCI, A. (1994). Doğal Gaz Sıvılaştırma Yöntemleri Sıvılaştırılmış Doğal Gazın (LNG) Nakli ve Depolanması Üzerine Bir İnceleme, Doğal Gaz Dergisi 38 (39): 40-56.
3. DOSSAT, R.J. (1981). Principles of Refrigeration. John Wiley and Sons Press, London. P. 53-162.
4. GÖKNER, M. (1993). Türkiye Geneline Doğal Gaz. Doğal Gaz Dergisi, 24(2): 25-30.
5. İNAN, F. (1996). Dünyada ve Türkiyede LNG ve Doğal Gaz Hareketleri, Petgaz dergisi, 8(1) 21-28.
6. ÖZDEMİR, T. ve TÜZMEN, M. 1994. Botaş Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) İthal Terminali, Botaş LNG İşletme Müdürlüğü Eğitim Notları, Ankara.
7. SAVAŞ, S. (1974). Soğutma Tekniğinde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar. T. M. M. O. Yayınları, Ankara, s.170.
8. STOECKER, W.F. (1989). Design of Thermal Systems. Mc. Graw Hill Book, London p. 80-547.