

# KLASİK KASKAD SOĞUTMA SİSTEMİ İLE DOĞAL GAZIN SIVILAŞTIRILMASININ MATEMATİKSEL ANALİZİ

Kürşat ÜNLÜ\*  
Recep YAMANKARADENİZ\*\*

## ÖZET

*Dünyamızdaki teknolojik gelişmelerin ve hızla artan nüfusun sonucuna paralel olarak enerji tüketimi de sürekli artmaktadır. Artan enerji tüketimi ülke ekonomilerinin giderlerini oldukça arttırdığı gibi çevre kirliliği problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu açıdan enerjinin hem daha verimli kullanılması hem de çevre açısından negatif etki yaratmayacak çeşitlerinin irdelenmesi gerekmektedir. Kömür ve petrol kullanımının çevreye verdiği zararlar ilgili kaygılar, doğal gaz rezervlerinin kavranmasıyla, doğal gaz kullanımını arttıran yeni teknolojilerle azalmıştır. Bu çalışmada; günümüzün önemli bir enerji kaynağı olan doğal gazın sıvılaştırılması incelenmiştir. Sıvılaştırılan doğal gazın hacmi küçülmekte ve depolanabilmektedir.*

## 1.GİRİŞ

Doğal gaz milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvan artıklarından oluşmuştur. Yaygın olarak kullanılması 2.Dünya Savaşı'ndan sonraya 1960'lı yıllara rastlar. Yeryüzü kabukları arasına gömülen bitki ve hayvan artıkları basınç ve sıcaklığın etkisi ile kimyasal değişikliklere uğrayarak doğal gazı meydana getirmiştir. Genellikle doğal gazı sıradağ yamaçlarında petrol yatakları ile birlikte veya serbest olarak rastlanılmaktadır. Bugün üretilen doğal gazın yaklaşık %40 kadarı petrol ile aynı yataklardan %60 kadarı ise petrolün bulunmadığı yataklardan sağlanmaktadır. Doğal gaz kullanımının birçok avantajı vardır.

\* Araştırma Görevlisi Yüksek Mühendis, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, BURSA

\*\* Prof.Dr. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, BURSA

Temizdir ve taşınması kolaydır. Doğal gaz öncelikle evlerde ısıtma , su ısıtma ve yemek pişirme gibi işlerde kullanılır. Bunlardan başka Doğal gaz Kimya endüstrisi için önemli bir hammadDEDİR. Doğal gazın ilk modern üretim ve tüketim tekniklerine A.B.D'de rastlanılmaktadır. İlkel yöntemlerle çıkarılan bu gaz Freodania şehrinin aydınlatılması için kullanılmıştır. Günümüzde doğal gaz, yakacak ve hammadde olarak çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yakacak olarak termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için, endüstri kuruluşlarında ısıtma, kurutma, pişirme, ısıl işlem fırınlarında kaynak işlemleri ve buhar üretimi için konut ve işyerlerinde ise sıcak su, pişirme, kurutma, ısıtma ve soğutma işlemleri için kullanılabilir. Kimyasal bileşiminde bulunan hidrokarbonlar nedeniyle sanayide amonyak, zambak, sentetik lastik, fotoğraf filmi, deterjan, boya, plastik ve gübre gibi maddelerin üretiminde doğal gaz, hammadde olarak kullanılır.

Geçmişte, doğal gazın geniş çapta kullanımında karşılaşılan problemler, bu mamulün uzun mesafeli taşınmasına ilişkin gerekli teknoloji ve maliyetine ilişkindi. Bu sebepten dolayı, son yıllara kadar tüketim sahaları gaz üretim alanlarına yakın çevrelerde olmuştur. Çeşitli enerji kaynakları arasında doğal gazın dünya pazarında böylesine önem kazanmasının nedeni diğer fosil kaynaklı enerji türlerine göre çevre kirliliğine çok daha düşük seviyelerde neden olmasıdır; dolayısıyla bu durum nakliye teknolojisinin gelişmesini, gazın kaynağından çok daha uzak coğrafi bölgelerde kullanımını kolaylaştırmıştır. Düşük maliyetli sıvılaştırma işlemi, Metan gazının üretim sahalarından sıvı halde(LNG) çok daha uzak bölgelere taşınmasına, aynı zamanda mamulün yeni ve geniş pazarlara girmesine neden olmuştur

LNG'nin uluslararası dolaşımı 1964 senesinde başlamıştır. Deneme döneminin olumlu sonuçlarını takiben, Arzew (Cezayir) sıvılaştırma tesisleri ile Convey Adası (İngiltere) yeniden gaza dönüştürme tesisleri arasında, deniz yolu nakliyesi ile doğal gaz temini sağlayan anlaşma imzalanmıştır. Bunun akabinde, çeşitli Avrupa ülkelerine LNG temini için, Libya ve Cezayir'de halen çalışmakta olan tesislerin inşaat projeleri başlamıştır. 1969 yılında, Japonya, Alaska'dan LNG teminine başlamıştır. Sıvılaştırma ve yeniden gaza dönüştürme tesislerinden başka, Peak Shaving adı altında, bünyesinde hem sıvılaştırma hem de yeniden gaza dönüştürme ünitelerini bulandıran tesisler mevcuttur. Uzak Doğuda doğal gaz pazarı tamamen Japonya'nın tümü LNG tüketimine bağlı ithalatı ile yönelir. Son yıllarda LNG talebi çok büyük miktarda artmıştır ve bu talebin %75 gibi büyük bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Mevcut sıvılaştırma tesislerinin üretim kapasiteleri ve gerçekleştirilmekte olan yeni projelerin üretim kapasiteleri, yüksek gelişme hızı gösteren Güney Kore ve Çin gibi ülkelerin taleplerini karşılamayabilecektir.

Son yıllarda LNG pazarında Avrupa'nın durumu değişmemiştir. Yürürlükte olan gaz temini anlaşmaları gaza dönüşüm tesislerinin üretim kapasitelerine bağlı olarak aralıklı diğer takviyelerle desteklenmektedir. Politik durumlardaki değişimler, LNG'nin gelişen ülkelerde termoelektrik enerjisindeki ve güncel yaşamdaki kullanımının artması ve çevreyle ilgili gelişen duyarlılık, boru hatlarıyla taşınmanın yetersiz kalmasına sebep olacaktır; buda LNG temini için cazip bir ortam oluşturacaktır.

İtalya pazarında ise, birbirinden farklı enerji kaynaklarına yönelme, doğal gazın milli pazarda önemli bir yer edinmesine neden olmuştur. 2000 yılı için öngörülen kullanım 70 milyar m<sup>3</sup>tür. Coğrafi durumu gereğince, Akdeniz'de

sahilleri bulunmasından dolayı; 70'li yılların başından itibaren LNG kaynağından faydalanabilmektedir. Halen LNG, Akdeniz Havzası'ndan Panigaglia (La Spezia) terminalinden yeniden gazla dönüştürülmek üzere getirilir; hatta bu tesis çok yakın bir geçmişte yeniden restore edilmiştir. Talebin artacağına dair beklentiler; doğal gazın likit halde Akdeniz Havzası dışında kalan üretici memleketlerden de boru hattıyla getirilmesi şeklini daha ekonomik bir hale getirebilir.

Ülkemizde de doğal gaz arz kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve güvenliğinin sağlanması amacıyla Botaş LNG satın alımı çalışmalarına 1984 yılında başlanmıştır. Yapılan ön fizibilite raporu olumlu çıktığı görülmüş, yer seçimi ve tesisin avan projesinin hazırlanması için M.LNG.Kellogg(İngiltere) firması ile 27.09.1985 tarihinde sözleşme imzalanmıştır. Yer seçimi ile ilgili çalışmalar sonucunda LNG ithal terminal sahası olarak Marmara Denizi'nin kuzey kıyısında, İstanbul'dan 95 km. uzaklıkta Marmara Ereğlisi'ndeki bölge uygun görülmüştür.

Yaygın kullanım alanı bulunan doğal gaz, atmosferik basınçta  $-161^{\circ}\text{C}$ ' 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.

\*  $-161^{\circ}\text{C}$ ' de 1013 mbar basınçtır.

\* Yoğunluğu  $460 \text{ kg/m}^3$ 'tür.

\* Üst ısı değeri  $25,2 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3 = 6,03 \times 10 \text{ kcal/m}^3$  tür.

\* Buharlaştırma ısı  $501,6 \text{ kJ/kg} = 120 \text{ kcal/kg}$ ' 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 yakittir.

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 depolanması 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<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S 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 kademede sıvılaştırma işlemine tabii 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 itibariyle 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 transferi ile enerjinin çevreye transferi gerekecektir. Bu amaçla gaz sürekli sıkıştırılarak, mümkünse yoğunlaştırılabilmesi 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°C üzerindeki sıcaklık farklarında tek kademeli soğutma yapmak uygun değildir. Dolayısıyla kademeli soğutma yapmak gerekmektedir. Bir gazın sıvılaştırılması 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 kısımla 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 sıvılaştırma 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 sisteminin bileşimi ve düşünülen fiyat

\* Sıvılaştırma sistemi için düşünülen kapasite ve debi

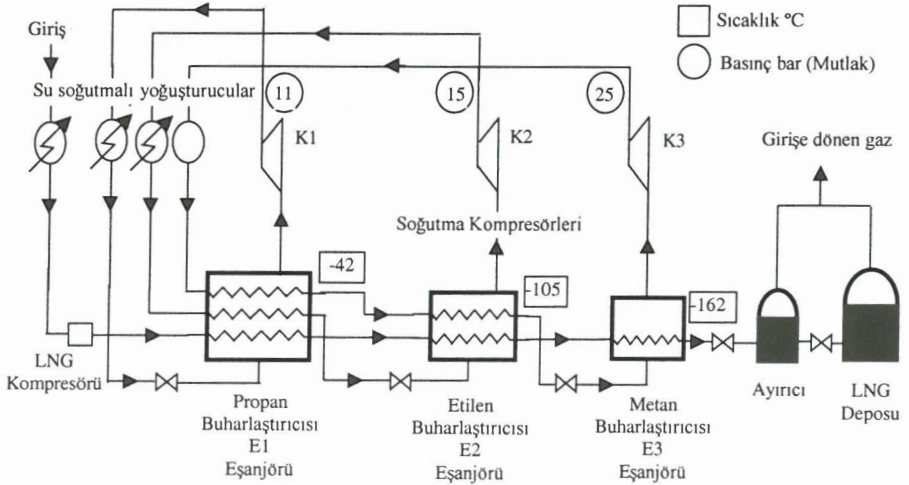
\* Sıvılaştırma sisteminin ve gazlaştırma tesislerinin konumu, yer veya bölgenin imkanları.

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

#### 2.4. Klasik Kaskad Sistemleri

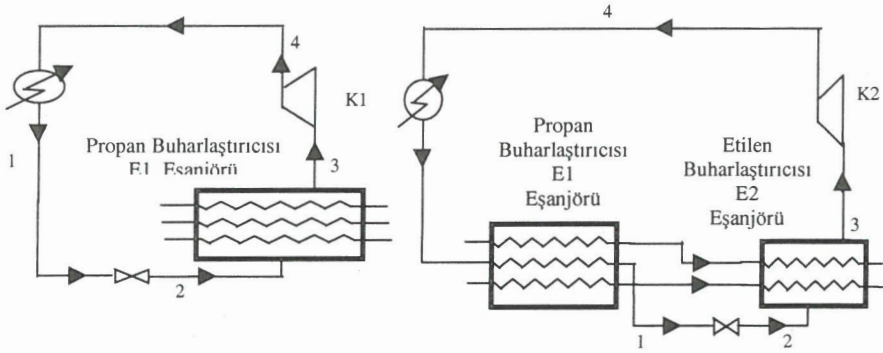
Klasik kaskad sistemlerinde soğutucu akışkan olarak birden fazla akışkan kullanılır. Kompresör kapasitesi ve ısı eşanjörlerinin verimi ile yatırım masraflarına bağlı olarak kademe sayısı, akışkan cinsi ve sayısı belirlenir. Her bir akışkan ayrı bir kapalı devre şeklinde tek kademeli yada birkaç kademeli olarak uygun sıcaklık ve basınç aralığında çalışır (Can ve Avcı, 1994). Akışkan grubu olarak üçlü kademede 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. 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 basıncı civarına 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  $-40^{\circ}\text{C}$ 'ye E1 eşanjöründe soğuduktan sonra E2 eşanjörüne gelir ve burada etilen çevriminde  $-100^{\circ}\text{C}$  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  $-100^{\circ}\text{C}$ 'ye soğuduktan sonra E3 eşanjörüne gelir. E3 eşanjöründe metan bulunmaktadır. Burada 1 barda  $160^{\circ}\text{C}$  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  $-100^{\circ}\text{C}$  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 sıvılaşmayan 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  $\ln P-h$  diyagramlarından yararlanılarak, sistemin belirli noktalarındaki özellikler (sıcaklık, basınç ve entalpi değerleri) tespit edilir.



Propan kullanılan soğutma devresi

Etilen kullanılan soğutma devresi

Şekil 2. Propan ve Etilen kullanılan soğutma devre şeması

Tablo 1. Propan kullanılan soğutma devresi basınç-entalpi diyagramından elde edilen değerler

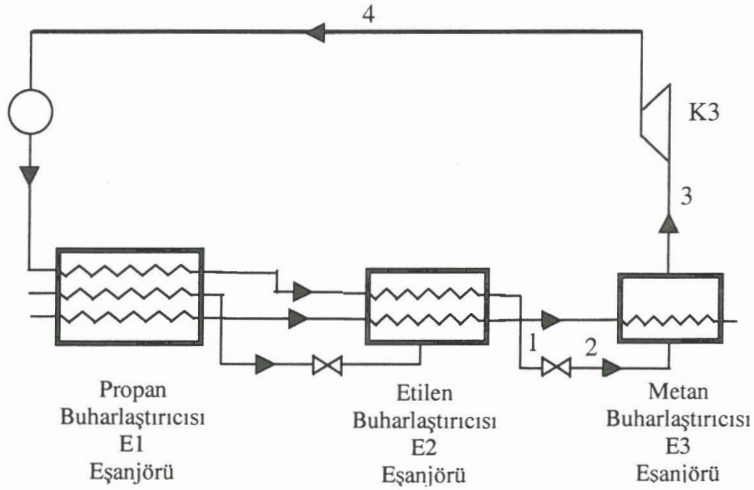
Noktalar	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Entalpi (kJ/kg)
1p : Kısılma vanası girişi	11	25	-1884.05
2p : Buharlaştırıcı girişi	1	-42	-1884.05
3p: Kompresör girişi	1	-42	-1622.3
4sp: Tersinir adyabatik kompresör çıkışı	11	58	-1504.9
4p : Adyabatik kompresör çıkışı	11	66	-1475.25

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



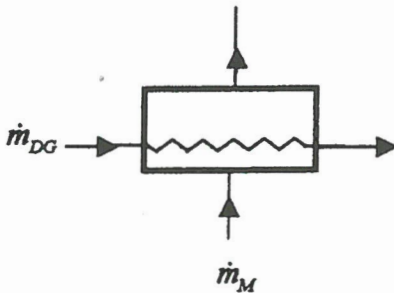


Şekil 3. Metan kullanılan soğutma devre şeması

Isı eşanjörleri :

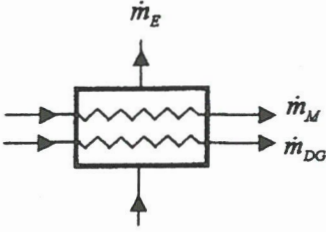
Metan buharlaştırıcısı için termodinamiğin I. kanunu yazılarak soğutucu akışkan metanın aldığı ısı, doğal gazın verdiği ısıya eşitlenir ve metanın debisi bulunur.

$$\dot{m}_M (h_{3M} - h_{2M}) = \dot{m}_{DG} (h_{fDG} - h_{gDG}) \quad (1)$$



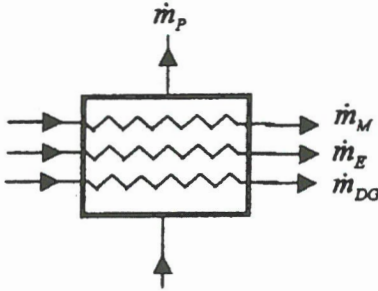
Etilen buharlaştırıcısı için Termodinamiğin I. kanunu yazılarak soğutucu akışkan etilenin aldığı ısı, doğal gaz ve metanın verdiği ısılarına eşitlenir ve etilen debisi bulunur.

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



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

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



Yoğuşturucular :

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

Propan kullanan soğutma devresi :

Propanın verdiği ısıyı su alacaktır.

$$Q_P = Q_{su_P} \quad (4)$$

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

Etilen kullanan soğutma devresi : Etilenin verdiği ısıyı su alacaktır.

$$Q_E = Q_{suE} \quad (6)$$

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

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 gönderen pompa güçleri aşağıdaki ifadeyle bulunmaktadır. Metan kullanan soğutma sisteminde ise su dolaştırılmaya gerek olmadığından pompa da kullanılmamaktadır.

$$N_{po} = \frac{m_{su} \Delta P}{\rho \eta_{1po}} \quad (8)$$

Kompresör güçleri :

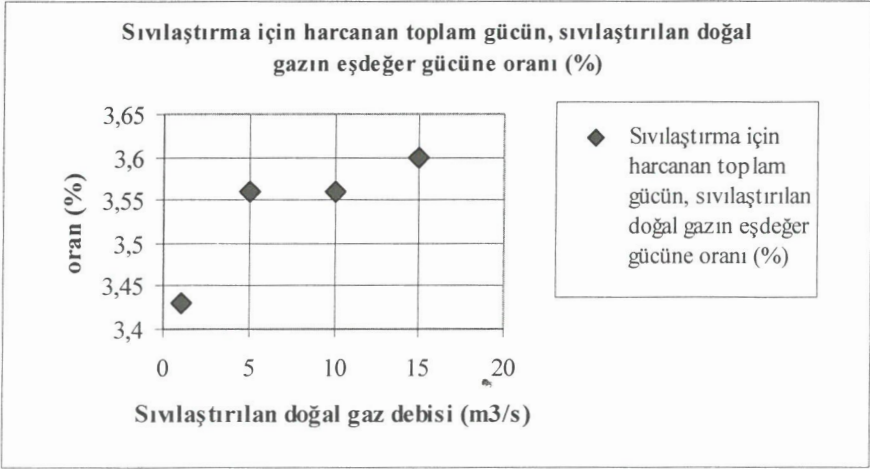
$$N_K = \frac{\dot{m}_s (h_{s_4} - h_{s_3})}{\eta_{1K}} \quad (9)$$

İfadeleriyle bulunmuştur.

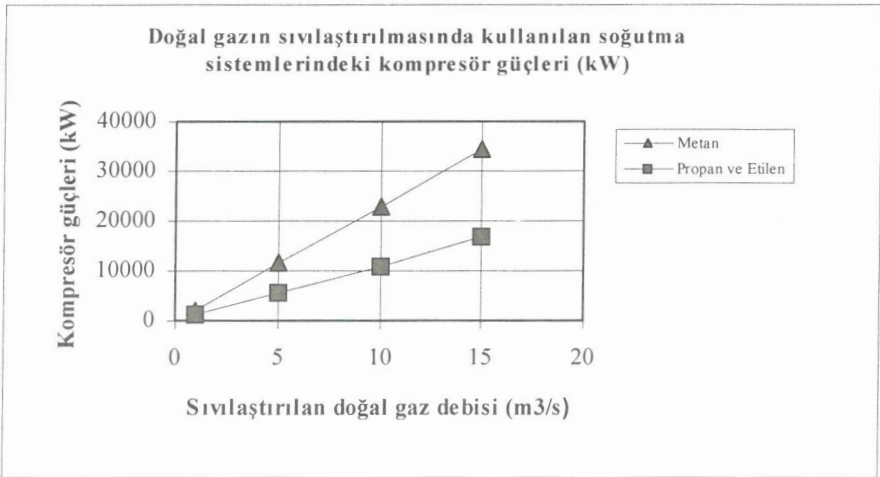
#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

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 4' 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. 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 5' de

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.



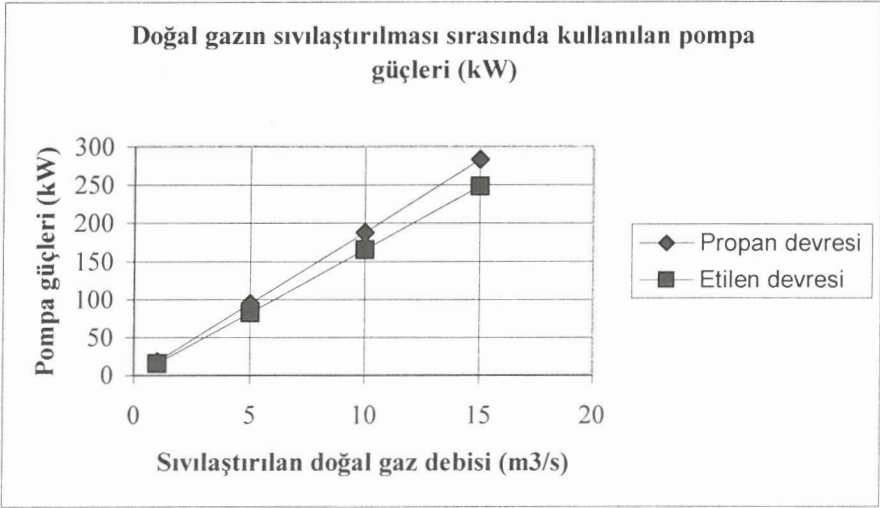
Şekil 4. Doğal gazın sıvılaştırılması için harcanan gücün sıvılaştırılmış doğal gazın eşdeğer güce oranı



Şekil 5. Soğutma sistemlerindeki kompresör güçleri

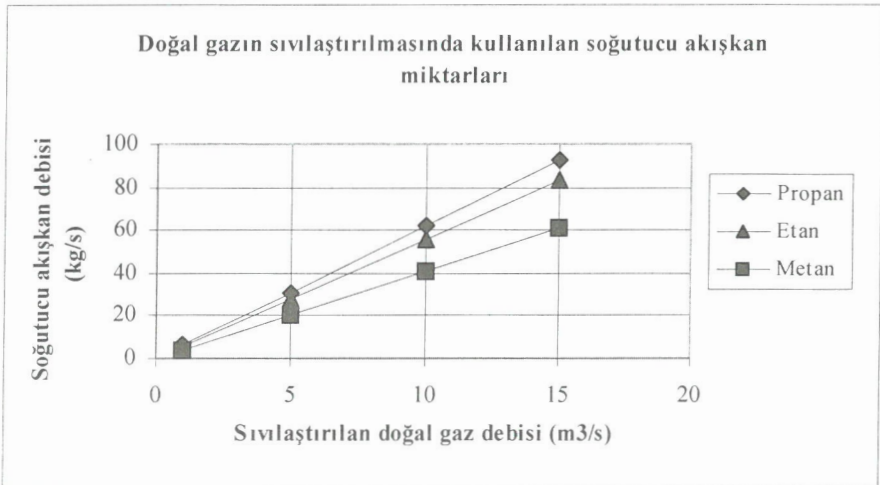
Doğal gazın sıvılaştırılmasında soğutma sistemlerinde yoğuşturucuların ısıyı almak amacıyla kullanılan pompalarının harcadıkları güçler incelendiğinde, Propan kullanılan soğutma devresindeki pompanın çektiği güç değeri, etilen

kullanılan soğutma devresindeki pompanın çektiği güç değerine göre daha fazladır. Şekil 6' da ise pompa güçleri verilmektedir.



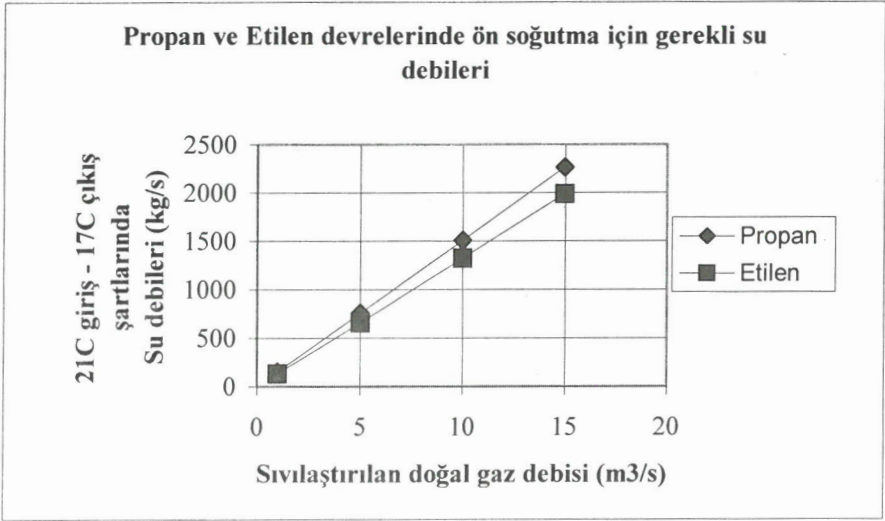
Şekil 6. Pompa güçleri

Doğal gazın sıvılaştırılması amacıyla kullanılan soğutma devrelerinde dolaşan soğutucu akışkan miktarları da Şekil 7' de gösterilmektedir.



Şekil 7. Soğutma sistemlerinde dolaşan soğutucu akışkan miktarları

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 8. Propan ve etilen devrelerinde ön soğutma için gerekli su debileri

Doğal gazın sıvılaştırılmasın da kullanılan soğutma devrelerinde ön soğutma amacıyla sisteme gönderilen su miktarları Şekil 8’ de görülmektedir. Propan devresinde kullanılan su miktarı, etilen devresinde kullanılan su miktarına nazaran daha fazladır.

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.

## KAYNAKLAR

- [1] BORGNAKKE, C. 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 Genelinde 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
- [9] YAMANKARADENİZ, R. 1997.Mühendislik Termodinamiğinin Temelleri Cilt I.Uludağ Üniversitesi Yayınevi. Bursa, 461s

### Semboller

N	: Güç (kW)
$\Delta P$	: Basınç kaybı (Pa)
$\rho$	: Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta_i$	: İç verim
$\dot{m}$	: Debi (kg/s)
h	: Entalpi (kJ/kg)

### Alt İndisler :

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

