

DOĞAL GAZ SIVILAŞTIRMA YÖNTEMLERİ, SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZIN (LNG) NAKLİ VE DEPOLANMASI ÜZERİNE BİR İNCELEME

Atakan AVCI, Muhiddin CAN, Muhsin KILIÇ

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle-BURSA

ÖZET

Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olayı Türkiye açısından oldukça yenidir. Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti arz kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve mevsimsel yükün dengelenmesi amacıyla Cezayir'den LNG ithal etmeyi kararlaştırmıştır. Marmara Ereğlisindeki terminale ilk gemi yüklenmesi 3 Ağustos 1994 tarihinde gerçekleşmiştir. Tekrar gaz haline getirilen LNG ana iletim hattına verilecektir. Dünya doğal gaz ticaretinde LNG nin payı 1988 yılında yaklaşık %22.1'dir. Tahminlere göre, LNG payının artarak gelecekte bütün dünyaya hızla yayılacağı beklenmektedir. Bu makalede, LNG'nin hazırlanması, yeniden sıvılaştırılması, dağıtılması ve kullanılması incelendi. Özellikle doğal gazın sıvılaştırılmasına ağırlık verildi.

Anahtar Kelimeler: Doğal gazın sıvılaştırılması, taşıma, depolama.

INVESTIGATION INTO NATURAL GAS LIQUEFACTION METHODS, LNG TRANSPORT AND STORAGE

ABSTRACT

Liquefied Natural Gas (LNG) processes are very new in Turkey. The Government of Turkey, due to diversification of supply and balancing of seasonal load, decided to import LNG from Algeria. The first shipment in Marmara Ereğli import terminal has been carried out in the August the 3 rd, 1994. LNG after regasification will be injected into the main transmission pipeline. The share of LNG in the world natural gas trade was approximately 22.1% in 1988. According to the forecast, LNG share will be rapidly spreading all over the world in near future. In this paper, treatment, liquefaction, transport, storage, regasification, distribution and utilisation of LNG are examined. Particular attention has given into liquefaction of natural gas.

Key Words: Natural gas liquafaction, transportation, storage

1. GİRİŞ

Doğal gaz, endüstrileşmiş ve kalkınma yolundaki pek çok ülkede uygulamaya konulan çeşitlendirme politikalarında hakettiği yerini alarak hızla yaygınlaşmış ve avantajlarını çok kısa bir sürede ispatlamıştır. Bugün üretilen doğal gazın yaklaşık %40 kadarı petrol ile aynı yatlardan kalan %60 ise petrolün bulunmadığı yatlardan sağlanmaktadır.

Dünyada ispatlanmış (güvenilir) doğal gaz rezerv miktarı 1989 yılı itibarı ile yaklaşık 116 trilyon metreküp değerindedir. Bu miktarın % 37'si Doğu Avrupa, %37'si Asya, %7'si Kuzey Amerika, %7'si Afrika, %6'sı Güney Amerika, %5'i Batı Avrupa ve %2 si Okyanustadır.

1988 yılında ülkelerarasında alınıp satılan doğal gaz miktarı 265 milyar metreküp olup bunun %22.1 kadarı sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olarak taşınmıştır. 17-20 Nisan 1989 tarihlerinde Nice (Fransa) şehrinde yapılan 9. Uluslararası LNG konferansında 1990'lı yılların sonlarına doğru dünya LNG talebinde artış beklendiğini 2000 li yıllarda mevcut tüketimin iki misli ve 2010'li yıllarda ise takriben üç misli artacağı tahmin edilmektedir.

Doğal gaz yerüstünde atmosferik basınçta -161 °C de sıvılaştırılarak sıvı fazda depolanabilmektedir. Bu arada doğal gazın hacmi takriben 650 defa daha küçüldüğü için özel olarak imal edilmiş gemilerle kolaylıkla taşınabilmektedir. Doğal gazın sıvılaştırılarak ticaretinin yapılabilmesi için ihraç eden ülkenin sıvılaştırma ve ihraç terminallerine, ithal eden ülkenin ise depolama, yeniden gazlaştırma ve LNG ithal terminaline ihtiyaçları vardır. Ülkemizde de doğal gazın temin kaynaklarının çeşitlendirilmesi, mevsimlik (kış-yaz) talep farklılıklarının giderilmesi ve doğal gaz arz güvenliğinin ve esnekliğinin artırılması için hemde gerektiğinde devreye sokulmak üzere Marmara Ereğlisinde bir LNG ithal terminali yapılmıştır. Terminalin toplam maliyeti yaklaşık 217.8 milyon U.S. dolarıdır. Terminal yaklaşık 25 km lik bir boru hattı ile ana hata bağlanacaktır. Türk BOTAS ve Cezayir SONATRACH şirketleri arasında 14 Nisan 1988 yılında imzalanan 20 yıllık sözleşmeye göre yılda 2 milyar metreküp LNG alınacaktır. Marmara Ereğlisindeki LNG ithal terminaline 3 Ağustos 1994 tarihinde Cezayirden ilk parti 125000 m³ LNG gelmiştir. Terminalde bulunan 3 adet 85000 m³ lük tanklarda yaklaşık 153 milyon m³ doğal gaz eşdeğeri LNG depolanabilecektir (Dikmen, 1993). Şubat 1994 de Rusya Federasyonu ve Ukrayna arasındaki sorunlar nedeniyle yaşadığımız sıkıntılar bundan böyle yaşanmayacaktır. Sistem en az 7-10 gün arasında sistemi besleme kapasitesine sahiptir. Öte yandan, toplam kapasitesi yılda 5 milyar m³ olan Marmara Ereğlisi LNG terminalinin tam kapasite ile çalışmasını sağlamak amacıyla Türkmenistan, Kuveyt, Katar, Libya, İran ve Nijerya gibi LNG ihracatçısı ülkelerden alım yapma imkanları da araştırılmaktadır.

Bu makalede, doğal gazın sıvılaştırılma metodları, depolanması ve nakli ile ilgili bir çalışma yapılmıştır.

2. GAZLARIN SIVILAŞTIRILMASI

Gazların sıvılaştırılması soğutmada daima önemli bir alan olmuştur. Birçok bilimsel, ilmi ve mühendislik prosesleri kriyojenik sıcaklıklarda (-100 °C sıcaklık değerinin altında) gazların sıvılaştırılması ile ilgilidir. Böyle işlemlere örnek olarak oksijen ve azotun havadan ayrıştırılması, roketler için sıvı yakıtların hazırlanması, düşük sıcaklıklarda malzeme özelliklerinin ve süper iletkenlerin incelenmesi gösterilebilir.

Kritik nokta değeri üzerindeki sıcaklıklarda bir saf madde sadece gaz fazındadır. Helyum, hidrojen ve azot 1 atm. basınç altında sırasıyla -268 °C, -240 °C, -147 °C gibi düşük doyma sıcaklıklarına sahiptir. Bu tür maddeler hiç bir zaman normal şartlar altında sıvı fazda bulunamazlar. Yine bu düşük sıcaklıklara bilinen basit yöntemlerle ulaşılamaz. Ancak özel yöntemlerle bu düşük sıcaklıklara ulaşılabilir (Çengel, 1989).

2.1. Doğal Gaz Sıvılaştırma Metodları

Kullandığımız doğal gaz, rezervlerine bağlı olarak, metan dışında su buharı, CO₂, H₂S, ağır hidrokarbonlar ve benzeri maddeler içerir(Hay, 1986). Sıvılaştırılması düşünülen doğal gazın (metan) öncelikle bu yabancı gazlardan arındırılması yada seçilen sıvılaştırma yöntemlerine bağlı olarak kabuledilebilir konsantrasyonlara düşürülmesi gerekir. Bilinen yöntemlerden biri ile doğal gaz saflaştırıldıktan sonra ikinci kademede sıvılaştırma işlemine tabi tutulur.

Bir NG sıvılaştırma tesisinde toplam maliyetin en büyük kısmı (%40-45) NG sıvılaştırma ünitesine aittir. Kalan kısım 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 birçok sıvılaştırma yöntemi ortaya çıkmıştır. Bunların bir kısmı pratik uygulama alanı bulmuş diğer bir kısmı teorik bazda kalmıştır. Esas itibariyle bunları bir kaç şekilde sınıflamak mümkündür burada üç ana grupta sıvılaştırma yöntemleri incelenecek ve bazı özellikleri üzerinde şeklinde durulacaktır

Tablo 1. Bazı gazların çığ nokta sıcaklıkları.

Basınç (P bar)	1.0	3.4	6.85	17.1	34.2
Metan	-159	-144	-133	-92	-71
Etan	-91	-63	-44	15.5	-
Propan	-46	-12	12	-	-

Etilen	-104	-80	-62	-8,3	-
Propilen	-49	-18	-5,6	-	-
Azot	-	-183	-174	-148	-133

NG ve benzeri bazı gazların 1 bar veya orta basınç seviyelerinde çığ nokta sıcaklıkları oldukça düşüktür(bkz Tablo 1.). Böyle bir gazın sıcaklığının düşürülebilmesi için iç enerjinin kullanılması yada ısı transferi ile enerjinin çevreye transferi gerekecektir. Bu amaçla gaz sürekli sıkıştırılarak mümkünse yoğunlaştırılması sağlanabilir. NG bu şekilde sıvılaştırmak istenirse ortam sıcaklığında basıncın 1200 barın üzerine çıkarılması gerekir ki bu yol pratik açıdan uygun değildir. Yada Joule-Thompson etkisinden yararlanarak gazın bir lülede genişletilmesi ile gaz sıcaklığı düşürülerek sıvılaştırma sağlanabilir. Mükemmel gazlarda entalpi sadece sıcaklığa bağlı olduğundan genişleme Joule-Thompson katsayısı sıfırdır yani lülede genişletme ile sıcaklıkta herhangi bir değişlik meydana gelmez. NG ve içeriğinde bulunan gazların ise lülede genişletme veya kısılma ile sıcaklıklarını düşürmek mümkündür. NG sıvılaştırma yöntemleri'de sayılan bu iki etkiyi birlikte veya ayrı ayrı kullanarak sıvılaştırmayı sağlamaktadırlar.

NG için 1 bar basınçta çığ noktası $-159\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup sıvılaştırma için doğal gazın sıcaklığının ortam sıcaklığından en az bu sıcaklığa kadar düşürülmesi gerekir. Bu amaçla kullanılacak eşanjör ve makinaların verimleri ve ekonomiklik gözönüne alındığında $60-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerindeki sıcaklık farklarında tek kademeli soğutma yapmak uygun değildir. Dolayısıyla kademeli soğutma yapmak gerekmektedir. Bir gazın sıvılaştırılması için onun çığ nokta sıcaklığının altına düşmek gerekir. 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 NG sıvılaştırma sistemleri üç ana grupta toplanabilir;

1. Kaskad soğutma sistemleri,
 - a. Klasik kaskad soğutma sistemleri; Soğutma amacıyla kademeli soğutma yapılan ve her kademede ayrı akışkan ve ayrı devrenin kullanıldığı sistemlerdir.
 - b. Karışmış akışkanlı kaskad soğutma sistemleri; Soğutmanın kademeli yapıldığı ancak soğutma amacıyla kullanılan farklı akışkanların karışmış olarak bulunduğu soğutma sistemleridir.

- c. Tek akışkanlı kaskad soğutma sistemleri; İkili yada tek akışkanlı, kademeli soğutma yapılan açık yada kapalı devreli soğutma sistemleridir.
2. Türbinle genişleme esaslı soğutma sistemleri; Tek yada çok akışkanlı, kademeli soğutma yapılan genişlemenin türbinde yapıldığı ve alınan işin kullanıldığı soğutma sistemleridir.
3. Stirling çevrimli soğutma sistemleridir.

Burada bu gruplamaya bağlı olarak birbirinden bazı farklılıkları olsa bile belli gruplara yakın olan NG sıvılaştırma sistemlerine ait basit çalışma şemaları izahlarıyla birlikte verilmiştir.

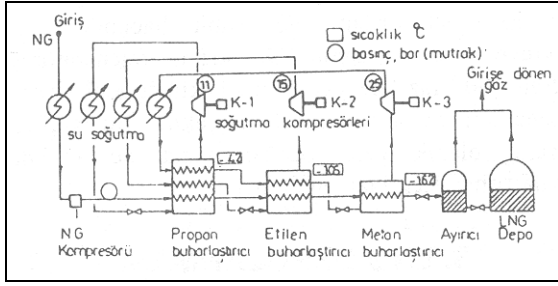
Bir sıvılaştırma sistemi seçilirken bazı kriterler ele alınır. Bu kriterler bağlı olarak LNG sistemi tercih edilir. Bu kriterlerden en önemli olanlarını şu şekilde sıralamak mümkündür;

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

Bu ana kriterlere ve varsa diğer kısıtlayıcı parametrelerde gözönüne alınarak uygun bir LNG sistemi seçilir.

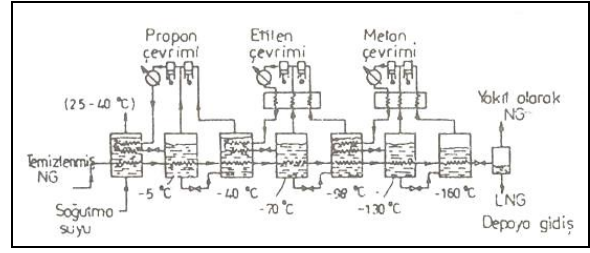
2.2. Klasik Kaskad sistemleri

Klasik kaskad sistemlerinde soğutucu akışkan olarak birden fazla akışkan kullanılır. Kompresör kapasitesi ve ısı eşanjörlerinin verimi ve yatırım masraflarına bağlı olarak kademe sayısı veya akışkan cinsi ve sayısı belirlenir. Herbir 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 grubu seçilebilir. Akışkan grubu seçildiğinde diğer çalışma şartları hemen hemen belirlenmiş demektir. Propan-etilen-metan soğutuculu klasik kaskad devresi için basit bir şema Şekil 1'de verilmiştir.



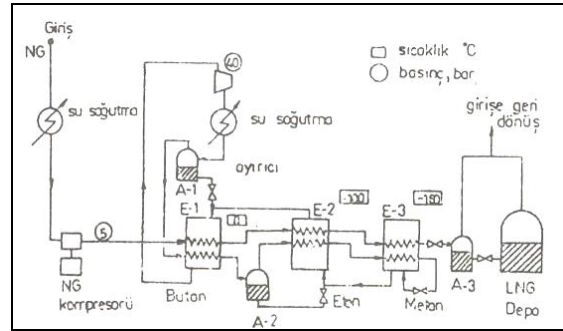
Şekil 1. Basit klasik kaskad soğutma çevrimi

Yabancı bileşenlerden ayrıştırılarak gelen doğal gaz su ile ön soğutma yapıldıktan sonra E-1 eşanjörüne gelir. E-1 eşanjöründe propan gazı ile $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye kadar soğutma yapılmaktadır. E-1 eşanjöründe ısı çekerek buharlaşan propan K-1 kompresöründe 11 bar basıncı civarına sıkıştırılıp su ile soğutulduktan sonra 1 bar basınca kadar kısılarak E-1 eşanjörüne döner ve propan çevrimi tamamlanmış olur. 3.5 bar civarında olan doğal gaz $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye E-1 eşanjöründe soğuduktan sonra E-2 eşanjörüne gelir ve burada etilen çevriminde $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar soğur. E-2 eşanjöründe etilen bulunmaktadır. Buradan ısı çekerek buharlaşan etilen K-2 kompresöründe 15 bar basınca kadar sıkıştırılır. Buradan E-1 eşanjörüne gelir ve burada ön soğutmaya uğradıktan sonra 1 bar basınca kısılarak E-2 eşanjörüne döner ve bu şekilde etilen çevrimi tamamlanır. Doğal gaz E-2 eşanjöründe $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye soğuduktan sonra E-3 eşanjörüne gelir. E-3 eşanjöründe metan bulunmaktadır. Burada 1 barda $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında doğal gazdan ısı çekerek buharlaşan metan K-3 kompresöründe 25 bar basınca sıkıştırıldıktan sonra propan çevriminde E-1 eşanjörüne gelir, çevrimin son kademesinde, ön soğutmadan geçtikten sonra etilen çevrimine gelir burada $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarına soğuduktan sonra 1 bar basınca kısılarak E-3 eşanjörüne döndürülür. Bu şekilde metan çevrimi tamamlanır. E-3 eşanjöründen geçen NG 1 bar basınca kısıldıktan sonra dengeleme ve depolama tankına gelir. Depolama tankında sıvılaşmayan yada çevreden ısı geçişi nedeniyle yeniden buharlaşan NG kısmı ise ya geri besleme ile LNG sistemi girişine yada kullanılmak üzere enerji santralına gönderilir. LNG sisteminin enerjisi santraldan karşılanıyorsa bu enerji santrali için gerekli NG miktarı, seçilen sisteme bağlı olarak, toplam gazın %15-20 si civarındadır. Bu tür sistemlerde kullanılan herbir gaz çevrimi bir kaç soğutma kademesini içermektedir. Şekil 2'de bunu gösteren basit bir şema görülmektedir.



Şekil 2. Klasik kaskad LNG sistemlerinde çevrimde kademeli soğutma.

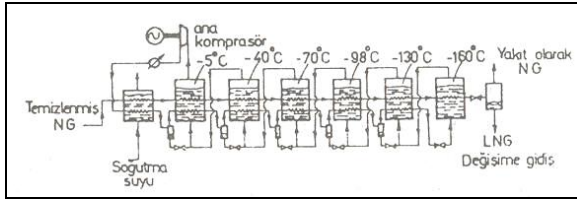
Klasik kaskad sistemlerinde gerek ayrı kapalı devreler ve gerekse kompresörlerin fazlalığı gibi maliyet artırıcı sistemlerin iyileştirilmesiyle çok kullanılan ikili veya daha fazla akışkanın karışımından meydana gelen kombine devreli soğutma sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde soğutma için kullanılan akışkanlar karışım halinde bir kompresörde sıkıştırılır ve herbir akışkan kendi çığ nokta sıcaklığında ısı çekerek soğutma yapar. Karışım belirlendikten sonra soğutma kademe sayısı belirlenmiş demektir. Örnek olarak propan-etan-metan gaz karışımı verilebilir. Bu karışımla çalışan bir soğutma çevriminin akış şeması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Klasik karışık akışkanlı kaskad sistemi.

Bu sistemde, saflaştırıldıktan sonra gelen NG, ön soğutmadan geçerek 5 bar basıncı civarında bir basınçta E-1 eşanjörüne girer. Burada $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra E-2 eşanjörüne gelir. E-2 eşanjöründe $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarına soğutulduktan sonra E-3 eşanjörüne geçer ve buradan geçerken $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarına kadar soğuyup çıkışta 1 bar basınca kısıldıktan sonra LNG olarak depolama tankına gider. Soğutucu karışım ise kompresörde 40 bar basınca kadar sıkıştırıldıktan sonra su ile soğutulur ve A-1 faz ayrıştırıcısına gönderilir. Burada etan ve metan gibi hafif gazlar ayrıştırıcısına gelir. E-1 eşanjöründe soğutma sonucu karışımdaki etan gazı yoğunlaşır. A-2 ayrıştırıcısından metan gaz fazında ayrılarak E-2 eşanjörüne gider. E-2 eşanjöründe soğuyan metan E-3 eşanjörüne geçer ve buradan

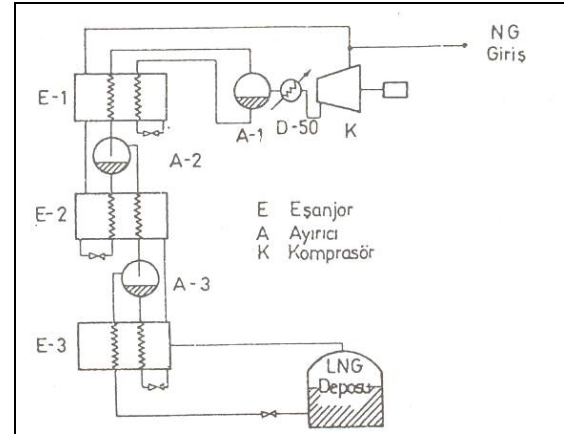
geçerken soğuma devam eder. Bu esnada metan yoğunlaşmaya başlar. Yoğuşan metan kısılarak E-3 eşanjörü beslenir. E-3 eşanjörü -160°C civarında bir sıcaklıktadır. A-2 ayırıcısından sıvı halde ayrılan etan kısılarak buharlaşması sağlanır. Bu buhar E-3 eşanjöründen gelen metan buharı ile birleştirilerek E-2 eşanjörüne soğutucu akışkan olarak döndürülür. Etan ve metan buharı ile soğutulan E-2 eşanjörü -100°C civarındadır. A-1 ayırıcısından sıvı olarak ayrılan propan kısılarak buharlaştırılır ve E-2 eşanjöründen gelen etan+metan buharı ile karıştırılarak soğutucu akışkan olarak E-1 eşanjörü beslenir. E-1 eşanjörü 0°C civarındadır. Buradan çıkan propan-etan-metan gaz karışımı kompresöre gelir. Kompresörde sıkıştırılarak soğutulduktan sonra ayırıcıya gelir. Bu şekilde çevrim tamamlanır. A-3 ayırıcısı ve LNG depolama tankındaki doğal gaz buharı ya geri besleme ile sisteme kazandırılır yada enerji santralinde kullanılır. Gerçekte şekilde verilen soğutma kademeleri daha fazladır. Bu kademeleri gösterir basit bir şema Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Karışık akışkanlı klasik kaskad sisteminde soğutma kademeleri.

Tek akışkanlı kaskad soğutma sistemlerinde ya NG dışında bir soğutucu gaz kullanılır yada soğutucu gaz olarak doğal gaz kullanılır. Bu tür kaskad çevrimi açık çevrim olarak isimlendirilir. Soğutma amacıyla NG kullanılıyorsa tek kompresör yeterlidir. Ancak farklı akışkan kullanıldığında ikinci bir kompresör kullanılabilir. Bu tür kaskad soğutma sistemine ait şematik bir diyagram Şekil 5'de verilmiştir. Bu diyagrama göre soğutucu akışkan olarak NG kullanılmaktadır. Saflaştırıldıktan sonra sisteme gelen doğal gaz bir kompresörde nisbeten yüksek basınçlara sıkıştırılır. Sıkıştırma sonucu sıcaklığı artan akışkan su ile soğutulduktan sonra A-1 ayırıcısına gelir. Buradan alınan buhar fazı ayrı bir devre ile E-1 eşanjörüne gönderilir. Burada soğuyan buharın bir kısmı yoğuşur. A-2 ayırıcısına gelen bu doğal gazın buhar fazı ayrı bir devre ile E-2 eşanjörüne gönderilir. A-1 ayırıcısında bulunan sıvı faz ayrı bir devre ile E-1 eşanjöründen geçirilerek kısmek soğutulduktan sonra kısılarak soğutucu akışkan olarak tekrar E-1 eşanjörüne gönderilir. A-2 ayırıcısından E-2 eşanjörüne gelen buhar soğutulduktan sonra kısmen yoğuşmuş olarak A-3

ayırıcısına gelir. A-2 ayırıcısındaki sıvı faz ise ayrı bir devre olarak E-2 eşanjöründe kısmen soğutulduktan sonra kısılarak soğutucu akışkan olarak tekrar E-2 eşanjörüne gönderilir. A-3 ayırıcısından alınan buhar E-3 eşanjöründe soğutulduktan sonra kısılarak LNG depolama tankına gönderilir. A-3 ayırıcısındaki NG sıvı fazı E-3 eşanjöründe kısmen soğutulduktan sonra kısılarak soğutucu akışkan olarak tekrar E-3 eşanjörüne verilir. Depolama tankında yoğuşmayan ve buhar fazında bulunan NG ise bir devre ile soğutucu akışkan olarak E-3 eşanjörüne gelir. E-3 eşanjöründe sıcaklığı artan NG E-2 eşanjörüne gelir. Burada kısmi soğutma yaparak E-2 eşanjöründe bulunan buhar fazı ile birlikte daha yüksek sıcaklıkta E-1 eşanjörüne ve burada da benzer olarak soğutma yaparak sıcaklığı artan buhar fazının tamamı giriş hattına ve buradan temizlenmiş doğal gaz ile birlikte kompresöre gelir, böylece çevrim tamamlanır. Bu sistemlerin en önemli avantajları; basittirler, tek kompresörde tek akışkanın sıkıştırılması yeterlidir, fazla kompresör ve eşanjör kullanılmaması nedeniyle fazla enerji sarfıyatı gerektirmez, LNG üretimi için belirli bir sınırlama yoktur ancak kompresör problemi olabilir, sistem kendi kendine çalışma şartlarına gelir, kolay devreye girer ve kolay devreden çıkar. Ana çalışma parametreleri kompresör basıncı, debi ve soğutma suyu sıcaklığıdır. Değişik yüklere uyumu kolaydır. Özellikle değişken yük taleplerinde tercih edilebilir.

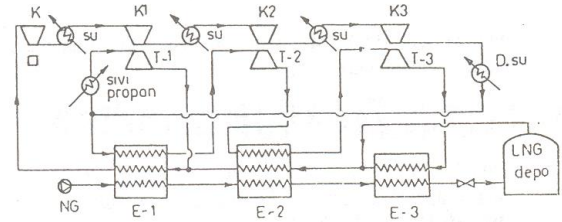


Şekil 5. Tek akışkanlı kaskad soğutma çevrimi

2.3. Türbinle Genleşme Esaslı Soğutma Çevrimleri

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 bir türbin

kullanılarak genleşme sağlanabileceği ve bu yolla elde edilen işin kullanılarak kompresörlerin çalıştırılabileceği ve sonuçta sistemin veriminin artacağı düşünülmüştür. Teorik olarak doğru görünen bu sonuç pratikte her zaman tamamen doğru olmasa da genelde sistemin verimini artırmakta ve daha fazla tercih edilir hale gelmektedir. Bu sistemlerde kısılma elemanları az da olsa kullanılmakla beraber çevrimdeki akışkanın büyük bir kısmı türbinler üzerinde genişlemektedir. Bu sistemler diğerlerine nazaran daha esneklerdir. Güç sarfiyatı azaltılabilir. Daha basittir. Eşanjör, faz ayırıcı, valf vb. elemanlar daha azdır. Daha yaygın kullanım alanı kazanmaktadır. USA-Boston, USA-Portland, USA-Astoria vb. örnek olarak gösterilebilir. Bu tür bir sistemin basit soğutma sistemi Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ana kompresörde sıkıştırılan gaz veya gaz karışımı su ile soğutulduktan sonra T-1 türbininden elde edilen iş ile K-1 kompresöründe sıkıştırılır. Bu gaz yada gaz karışımı bir eşanjörde soğutulduktan sonra T-2 türbininden elde edilen iş ile çalıştırılan K-2 kompresöründe sıkıştırılır. Gaz yada gaz karışımı yeniden bir eşanjörde soğutulduktan sonra T-3 türbininden elde edilen iş ile çalıştırılan K-3 kompresörüyle son kademe olarak sıkıştırıldıktan sonra akışkanın bir kısmı T-1 türbininde genişletilerek E-1 eşanjörüne soğutucu akışkan olarak gelir ve daha sonra ana kompresöre gider. T-1 türbininden geçmeyen akışkanın diğer kısmı E-1 eşanjöründe soğutulduktan sonra T-2 türbininin de genişletilir. Bu esnada türbinlerden iş elde edilir. T-2 türbininden çıkan gaz veya gaz karışımı E-2 eşanjöründe soğutulduktan sonra T-3 türbininde genişletilir. T-3 türbininde genişleyen gaz soğutucu akışkan olarak E-3 eşanjörüne gelir. E-3 eşanjöründe kısmen sıcaklığı artan gaz daha yüksek sıcaklıktaki E-2 eşanjörüne geçer orada gerekli soğutmayı yaptıktan sonra E-1 eşanjörüne ve bunu takiben ana kompresöre gider. Sıvılaştırılacak doğal gaz ise basınçlı olarak saflaştırma ünitesinden ön soğutmaya tabi tutulduktan sonra sırasıyla E-1, E-2 ve E-3 eşanjörlerinden geçerek kademeli olarak soğutulduktan sonra bir kısılma valfinda atmosfer basıncına kadar kısılarak LNG depolama ünitesine gider. LNG depolama tankında bulunan buhar fazındaki doğal gaz ise geri besleme ile eşanjörlere soğutucu gaz olarak gönderilebilir. Daha sonra geri besleme ile sisteme geri döndürülür. Yada doğrudan enerji santralinde kullanılmak üzere gönderilebilir. Bu tür sistemlerin en önemli sakıncalarından biri türbinlerde genleşme esnasında iki fazlı akışın oluşmamasını temin etmektir ki bunun için sistemin hassas tasarımı gerekir.

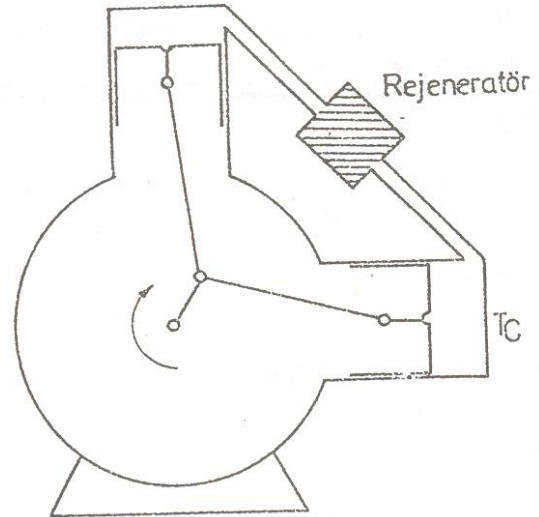


Şekil 6. Türbinle genleşme esaslı soğutma çevrimi

2.4. Stirling Çevrimi Esaslı Soğutma Sistemleri

LNG sistemlerinde kullanılan diğer bir soğutma yöntemi ise Stirling çevrimini esas alır. Sıvının buharlaşması ile düşük sıcaklıkta çekilen ısının sıkıştırma ve sıvılaştırma ile yüksek sıcaklıkta atılması şeklinde gerçekleşir. Verimi artırmak için rejeneratör kullanılır. Böyle bir makina için verim Carnot makinası veriminden daha düşüktür. Gerçekte karşılaşılan çevrimlerde soğutma ve ısı girişi sabit hacimden daha çok sabit basınçta meydana gelmektedir.

Bu tür soğutma çevrimleri daha küçük kapasiteli LNG sistemlerinde kullanılır. USA-Blytherville tesisi örnek gösterilebilir. Şekil 7. de basit bir Stirling soğutma çevrimi mekanizması gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sabit yüksek sıcaklıkta sıkıştırılan NG, sabit hacimde ısıyı çevreye atarken ısının bir kısmı rejeneratörde tutulur. 90° faz farkıyla sabit sıcaklıkta genişlerken rejeneratörden sabit hacimde ısı çekilir. Bir taraftan sürekli olarak gelen doğal gazın bu şekilde sıvılaştırma işlemi tamamlanır.



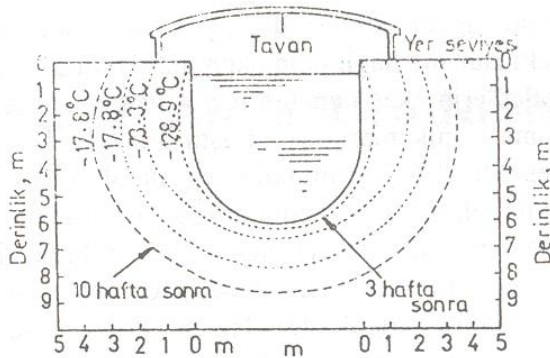
Şekil 7. Stirling soğutma çevrimli soğutma makinası çevrimi

3. LNG DEPOLANMASI

Doğal gaz tüketicisi ülkeler doğal gazın temininde tek bir kaynağa bağlı kalmamak ve belli aylarda meydana gelebilecek talep fazlalığına cevap verebilmek için doğal gazı depolamak ve gerektiğinde kullanmak zorundadırlar.

LNG depolarına hem sıvılaştırma terminallerinde hem de ithal terminallerinde ihtiyaç duyulmaktadır. Depolama tankları genel olarak; çift duvarlı metalik tanklar veya çift duvarlı beton tanklar olarak yapılmaktadır.

Depo içerisinde buharlaşacak doğal gaz miktarını LNG tankı ile çevresi arasındaki ısı alışverişini tayin eder. Ortalama buharlaşma miktarı tankın depolama kapasitesine bağlı olarak değişir. İyi bir tank izolasyonunda 15000 m³ e kadar LNG depolama kapasitesine sahip bir tank için hacimsel olarak %0.08 m³/gün, 50000 m³ e kadar LNG depolama kapasiteleri için %0.05 m³/gün ve 150000-180000 m³ e kadar depolama kapasitesine sahip tanklar için %0.03 m³/gün buharlaşma miktarları aşılmamalıdır. Anlaşılabileceği gibi buharlaşan doğal gaz miktarı depolama kapasitesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Tank ile çevre arasındaki ısı kayıplarının başlangıçtan itibaren sürekli rejim haline gelmesi için geçen süre oldukça büyüktür. Dolayısıyla uzun süreli olmayan depolamada ısı transferi geçici rejimde olmaktadır. Bunu dairesel kesitli bir doğal gaz depolama tankının doldurulmasından itibaren çevresindeki sıcaklık gradyanının gelişimini Şekil 8'de görmek mümkündür. Burada donmuş topraklı depolama tankında 3 haftadan 10 haftaya kadar olan sıcaklık gradyanının dağılımı verilmektedir. 10. hafta sonunda tank içindeki sıcaklık -161 °C iken, 9 m derinlikte sıcaklık -17.8 °C değerine kadar düşmektedir.



Şekil 8. Bir LNG depolama tankında tank çevresinde zamanla sıcaklığın değişimi

4. LNG'İN NAKLİ

Düşük sıcaklıkta hizmet verecek sistemler için uygun malzeme ve üretim teknikleri seçimi özellikle LNG tankerleri ve yer üstü depolama tanklarında oldukça önemlidir.

Üretilen LNG özel gemilerle deniz aşırı ülkelere taşınmak zorundadır. Boru hattı ile deniz aşırı ülkelere taşınması mümkün değildir. LNG ticaretinde bazen alıcı bazen satıcı ve bazen de alıcı-satıcı ortaklaşa kurulan üçüncü şirketlerce taşıma gerçekleştirilir. Burada esas olan FOB (gemide teslim) veya CIF(karada teslim) olarak ticaretin gerçekleştirilmesidir. FOB satışlarında bütün taşıma riski alıcıya, CIF satışlarında ise satıcıya aittir (Yardım, 1990).

LNG tankerleri depolarının yapımı iki çeşittir:

1. Kendi taşıyan Kargo tankerler (self-importing or free-standing cargo tank)
2. Ayrı depolu tankerler (integral tank construction)

Genelde tankerler balpeteği şeklinde ve % 9 Ni çeliğinden imal edilirler. İzolasyon maddesi olarak cam takviyeli plastikler kullanılmaktadır. Ayrı depolu tankerlerin kullanım alanı daha fazla, ölü alan ise daha azdır. Yükleme ve taşımada izolasyon gerektirmez. Güvertesinin düzgün olması geminin rüzgarla daha rahat manevra yapabilmesini ve geminin iskeleye yanaşmasını veya iskeleye bağlı kalması durumunda da rüzgara karşı direncinin artmasını sağlar. Bu tip tankerler yangına karşı daha güvenlidir ve kaptan köşkünden daha iyi görüş imkanı sağlarlar.

Her iki tanker teknolojisinin farklılıklarına rağmen, elde edilen mevcut kaza raporlarından, LNG gemilerinin riskinin diğer klasik tip gemi risklerinden fazla olmadığı hatta gemi teknesinin çift olması ve uzman personel tarafından işletilmesi durumunda sözkonusu riskin daha az olduğu iddia edilebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kullanımı giderek artan doğal gaz ısınma sanayi yanında önümüzdeki dönemde enerji üretiminde de ağırlığını iyice hissettirecektir. Bu sebepten, arz artırma ve çeşitlendirme çabalarında sürmektedir. Rusya'nın yanısıra Cezayir den de LNG ithaline başlanmıştır. Arz miktarını artırmak için Marmara

Ereğlisinde kurulan 5 milyar metreküp kapasiteli LNG tesislerine ilave olarak İskenderun körfezi ve İzmir Aliğa da yeni LNG tesisleri kurulması için fizibilite çalışmaları sürdürülmektedir. Böylece doğal gaz tüketimindeki süreklilik güvence altına alınmış olacaktır.

Ayrıca, bir yandan doğal gaz sisteminden yararlanacak doğal gaz kullanıcılarına kesintisiz doğal gaz sağlanabilmesi diğer yandan yıl içerisinde talepteki zamana bağlı dalgalanmalarda oluşabilecek pik taleplerin karşılanabilmesi amacıyla yeraltı depolama imkanlarının araştırılmasına devam edilmektedir. LNG terminaline ek olarak, doğal gaz yeraltı depoları inşa etmenin en az 5-6 yıl alması ve peak-shaving' den dolayı engeç 1996 yılında depo ihtiyacının belirlenmesi sebebiyle ana iletim hatların yakın bölgelerde (Trakya bölgesi ve tuz gölü havzasında) depolama imkanlarının belirlenmesi için detaylı jeolojik araştırmaların en kısa zamanda başlaması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

Dikmen, H., 1993, "Marmara Ereğlisi LNG İthal Santrali", Doğal Gaz Dergisi, Aralık, sayı 29

Lom, W. L., 1974, "Liquefied Natural Gas", Applied Science Publishers Ltd., London

Çengel, Y. A and Boles, M.A., 1989, "Thermodynamics an Engineering Approach, McGraw Hill Book Co., Singapore

Hay, E. N., 1986, "Guide to New Natural Gas Utilization Technologies", The Fairmont Preş. Inc., USA

Yardım, G., 1990, "Sıvılaştırılmış Doğal Gaz Zinciri", Doğal Gaz Dergisi, Ağustos, sayı 9.