



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 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: Notural gaz liquafaction, transportation, storage

1.GİRİŞ

Doğal gaz, endüstrileşmiş ve kalkınma yolundaki pek çok ÷lkede uygulamaya konulan çeşitlendirme politikalarında hakettiği yerini alarak hızla yaygınlaşmış ve avantajlarını çok kısa bir sürede ispatlamıştır.

Doğal gaz birincil enerji kaynaklarından olup organik teoriye göre milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvan atıklarından oluşmuştur. Yeryüzü kabukları arasına gömülen bu artıklar, basınç ve ısı etkisiyle, kimyasal değişikliklere uğrayarak doğal gazı meydana getirmiştir. Genelde doğal gaza sıradağ yamaçlarında petrol yatakları ile birlikte veya serbest olarak rastlanmaktadır. Bugün üretilen doğal gazın yaklaşık %40 kadarı petrol ile aynı yatlardan kalan %60 ise petrolun 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 ÷lkelerarasında 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 küçüldüğu için özel olarak imal edilmiş gemilerle kolaylıkla taşınabilmektedir. Doğal gazın sıvılaştırılarak ticaretinin yapılabilmesi için ihraç eden ÷lkenin sıvılaştırma ve ihraç terminallerine, ithal eden ÷lkenin ise depolama, yeniden gazlaştırma ve LNG ithal terminaline ihtiyaçları vardır. ÷lkemizde 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 BOTAş 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 yaşanmıyacaktır. 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, İnan ve Nijerya gibi LNG ihracatçısı ÷lkelerden alım yapma imkanları da araştırılmaktadır.

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

2. TARİHİ GELİşİM

Doğal gazın sıvılaştırılması ilk defa 1910 yılında A.B.D. nin Virginia Eyaletinde gerçekleştirildi (Lom, 1974). Gaye, ticari amaçlı olarak doğal gazdan etan ve propanın sıvı halde ayrıştırılması idi. Doğal gaz kombine sıkıştırma ve soğutma işlemleri kullanılarak sıvılaştırıldı ve elde edilen etan ve propan yerel olarak satıldı.

Cabot 1914 yılında doğal gazın sıvılaştırılması, depolanması ve taşınması ile ilgili olarak patent başvurusunda bulundu. 1917 yılında 1.225.574 nolu patenti yüksek basınçlı soğutma ve yoğuşma işlemleri için aldı. Aynı yıl doğal gazdan helyum elde etme fabrikası Texas ta Linde firması ve ABD Maden Araştırma Dairesi tarafından birlikte kuruldu. İkinci olarak 1929 yılında Amarillo yakınlarında kurulan LNG sistemi halen düzenli olarak çalışmaya devam etmektedir.

1920 yılında, ABD de nehir yolu ile LNG taşınmasını sağlamak için özel izole edilmiş konteynerlerin tasarım ve konstruksiyon konusunda birçok patent başvurusu yapıldı ve bunlar kabul edildi. 1937 yılında İngiltere de Egerton doğal gazın

sıvılaştırılmasının geliştirilmesi ile depolanması işlemlerini özellikle ekonomik peak-sharing sistem için kentsel bölgelerde tüketici pazarlarına gazın dağıtılmasını önerdi. Bu sistem bugün British Gas Council ve ABD ve diğer ülkeler tarafından ekonomik metod olarak kullanılmaktadır.

1937 yılında LNG depolama ve taşınımı ile ilk patent Twomey'e verildi. Bundan üç sene sonra Hope Doğal Gaz şirketi Cornwell'de takriben 8000 m³/gün kapasiteli bir pilot LNG fabrikasını kurdu. Burada kaskad (cascade) sıvılaştırma metodu kullanıldı. Bu metodda etan, amonyak ve metan soğutma çevrimleri kullanılıyordu. Metan için 34 bar basınç seviyesinden başlayan bir genleşme prosesi takip edilerek atmosfer basıncında sıvılaşması sağlanıyordu. Sıvılaştırma maliyeti takriben 0.5 cent/m³ tahmin edildi. Tesisin buharlaşma kısmındaki ısı eşanjörleri düşük basınçtaki buharla beslendiğinde tesis maliyeti 0.8 cent/m³ olarak tahmin edildi.

Doğu Ohio Gaz Firması Cleveland'da 1941 yılında daha geniş bir LNG tesisini \$ 1.25 milyon maliyetle kurdu. 113000 m³/gün kapasiteli tesisin amacı, yaz peryodu boyunca meydana gelen fazlalık, doğal gazı sıvılaştırıp depolayarak kiş peryodunda peak talebi karşılamaktır. LNG depolama kapasitesi 6800 m³ olup bu miktar 4.25 milyon m³ dogal gaz hacmine eşittir. Depolama tankları 3 adet olup 17.4 m çaplı küre şeklinde. Çevresi 915 mm mantar tabakası ile izole edilmiştir. Üç yıl sonra 13.1 m yükseklikte ve 21.4 m çapında silindirik bir tank daha inşa edilmiş ve bu tank ta 915 mm kalınlığında asbest veya amyant ile izole edilmiştir. 8 ay sonra bu tank beklenmedik şekilde çökmüş ve LNG tesisi tutuşmuş, nihayetinde meydana gelen patlama sonucu 128 kişi ölmüştür. Zarar \$ 7 milyondur. Çökme nedeni olarak uygun olmayan çelik (%3.5 Ni çeliği) kullanımı gösterilmiştir. Bu tesis tekrar kurulmamıştır.

1947 yılında, Dallas Dreşer Industries Ltd.(Texas) Rusya da Moskova bölgesi için 127000 m³ sıvılaştırma ve depolama kapasiteli LNG tesisinin tasarımı ve inşasını yaptı. Tesis Moskova da geniş bir depolama tankı olarak kullanıldı. 1940-1950 yılları arasında ABD de birçok sıvılaştırma ve depolama projesi geliştirildi. 1955 yılında, Constock Int. Methane Ltd. LNG nin okyanusta taşınması ile ilgili birçok proje ve tasarımı çalışmalarını yürüttü. İki yıl sonra British Gas Council şirketi Constock Int. Methane Ltd. şirketi

ile anlaşma yaparak Büyük Britanya da tüketilen gazın %10 kadarını ABD den ithal etti. Lake Charles yakınlarında ABD şirketi LNG ve depolama tesislerini kurdu. İngiliz şirketi ise Convery adalarından ithal edilen LNG nin boşaltılma ve depolanması için tesisleri kurdu.

Yeni bir firma olan British Methane Ltd. dünyada ilk kez okyanusta sıvı metanı kargo gemisiyle taşıyacak "Methana Pioneer" i kurdu. Methane Pioneer okyanusta 6 başarılı LNG naklini gerçekteşirdi.

1960'lı yıllarda Arzew (Cezayir) de CAMEL (Compagnie Algerienne du Methane Liquide) adlı şirket tarafından Afrikanın en büyük kapasiteli LNG tesisi (4230000 m³/gün) kuruldu. Özellikleri; 18.6 MW elektrik üretme santrali, 96000 m³ hacimde ısı eşanjörleri, 7.5 m³/s debisinde soğutma deniz suyu ve toplam 140 km uzunluğunda boru hattına sahiptir. 1964 ten itibaren LNG, İngiliz Methane Princeş ve Methane Progreş ile Fransız Jules Werne adlı taşıyıcılar ile Cezayir den İngiltere ve Fransa ya taşındı. 1970 li yılların başında Eşe Petroleum Company ile ana firma Eion Company dünyanın ileri gelen taşıma şirketleri arasında yerlerini aldılar.

Dünyanın en büyük LNG tüketicisi olan ABD ile Fransa, İtalya ve İspanya 1971 sonundan beri Libya dan LNG ithal etmektedir. Metan tanker kapasitesi 120000 m³ olup takriben yılda 1 milyar m³ LNG Cezayir'den ABD nin doğu kıyılarına taşınmıştır. Bu değer ısıl kapasite olarak 1 milyon ton sıvı benzin taşınmasına eşdeğerdir.

Aşırı talep durumunda sıvılaştırılmış gaz ABD, Japonya ve Avrupa ülkelerine 1975 yılı sonlarına kadar Cezayir, Libya ve Brunei den ithal edilirken bu gün bu ihraç eden ülkelere Katar, Ebu Dabi, İran, Venezualla, Avustralya, BDT Baltık/Sibirya, Nijerya ve Endonezya gibi ülkeler katılmıştır.

Metan taşıyıcılar zincirin bir halkası olarak düşünölmelidir. Besleme terminalinde doğal gaz kaynakları, sıvılaştırma tesisi ve depolama imkanı ile yeniden gazlaştırma ve gaz depolama imkanlarını ihtiva eder. Gemide ve depolamada LNG tanklarının konstruksiyon ve tasarımında gelişen yeni teknikler, kesinlikle gelecekte LNG nin deniz yolu ile taşınması kadar karayolu ilede taşınmasını cazip kılacaktır.

3. 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 ulaşılmaz. Ancak özel yöntemlerle bu düşük sıcaklıklara ulaşılabilir (Çengel, 1989).

LNG nin birçok kullanım alanları vardır. Bunlara gaz türbinleri, uçak sanayii, özellikle helikopterler için jet yakıtı olarak, otomotiv sanayii, soğutma amacıyla ve diğer alanlarda kullanılmaktadır. Türkiye de Aygaz Anonim şti. bir tarafta kesintili doğal gaz tarifesinden yararlanmak isteyen sanayi kuruluşlarına Aygaz LPG yedekleme sistemi ile hizmet verirken diğer taraftan LPG ye alternatif olarak LNG sistemleri üzerinde de çalışmalar yapmaktadır.

3.1. 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 düşünölen doğal gazın (metan) öncelikle bu yabancı gazlardan arındırılması yada seçilen sıvılaştırma yöntemlerine bağlı olarak kabuledilebilir konsantrasyonlara düşürölmesi gerekir. Bilinen yöntemlerden biri ile doğal gaz saflaştırıldıktan sonra ikinci kademedede 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 mümkünsede 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 düşürölmesi için iç enerjinin kullanılması yada ısı transferi ile enerjinin çevreye transferi gerekecektir. Bu amaçla gaz sürekli sıkıştırılarak mümkünse yoğuşturulması 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 lüledede enişletilmesi ile gaz sıcaklığı düşürölerek sıvılaştırma sağlanabilir. Mükemmel gazlarda entalpi sadece sıcaklığa bağlı olduğundan genleşme Joule-Thompson katsayısı sıfırdır yani lüledede genleştirme ile sıcaklıkta herhangi bir değişlik meydana gelmez. NG ve içeriğinde bulunan gazların ise lüledede genleştirme veya kısılma ile sıcaklıklarını düşürölme mümkündür. NG sıvılaştırma yöntemleri'de sayılan bu iki etkiyi birlikte veya ayrı ayrı kullanarak sıvılaştırmayı sağlamaktadırlar.

NG için 1 bar basınçta çığ noktası -159 °C olup sıvılaştırma için doğal gazın sıcaklığının ortam sıcaklığından en az bu sıcaklığa kadar düşürölmesi gerekir. Bu amaçla kullanılacak eşanjör ve makinaların verimleri ve ekonomiklik gözönüne alındığıında 60-90 °C üzerindeki sıcaklık farklarında tek kademeli soğutma yapmak uygun değildir. Dolayısıyla kademeli soğutma yapmak gerekmektedir. Bir gazın sıvılaşabilmesi 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 genleşme esaslı soğutma sistemleri; Tek yada çok akışkanlı, kademeli soğutma yapılan genleşmenin 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 sečilirken bazı kriterler ele alınır. Bu kriterler bağlı olarak LNG sistemi tercih edilir. Bu kriterlerden en önemli olanlarını řu 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 düşünölen fiyat,
- LNG için düşünölen 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.

3.2. 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 řema Şekil 1 de verilmiştir. Yabancı bileşenlerden ayrıştırılarak gelen doğal gaz su ile ön soğutma yapıldıktan sonra E-1 eşanjörüne gelir. E-1 eşanjöründe propan gazı ile -40 °C ye kadar soğutma yapılmaktadır. E-1 eşanjöründe ısı çekerek buharlaşan propan K-1 kompresöründe 11 bar basınca 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 °C ye E-1 eşanjöründe soğuduktan sonra E-2 eşanjörüne gelir ve burada etilen çevriminde -100 °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. Dođal gaz E-2 eşanjöründe -100 °C ye soğuduktan sonra E-3 eşanjörüne gelir. E-3 eşanjöründe metan bulunmaktadır. Burada 1 barda -160 °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 °C civarına soğuduktan sonra 1 bar basınca kısılarak E-3 eşanjörüne döndürölür. Bu şekilde metan çevrimi tamamlanır. E-3 eşanjöründen gečen 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 santralı 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 görölmektedir. Klasik kaskad soğutma sistemleri halen kullanılmaktadır. Örnek olarak USA-Birmingham, Cezayir-Arzew ve Alaska-Kenai tesisleri verilebilir. Bu günkü teknolojik seviyede klasik kaskad LNG sistemleri diğerlerine nazaran daha pahalıdır. Bunlar daha çok ilk kurulan LNG sistemleridir.

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. Bu sistemde, saflaştırdıktan sonra gelen NG, ön soğutmadan geçerek 5 bar basıncı

şekil 1. Basit klasik kaskad soğutma çevrimi

civarında bir basınçta E-1 eşanjörüne girer. Burada -40 °C sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra E-2 eşanjörüne gelir. E-2 eşanjöründe -100 °C civarına soğutulduktan sonra E-3 eşanjörüne geçer ve buradan geçerken -160 °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 ayırıcısına gönderilir. Burada etan ve metan gibi hafif gazlar ayırıcısına gelir. E-1 eşanjöründe soğuma sonucu karışımdaki etan gazı yoğuşur. A-2 ayırıcısından 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 yoğuşmaya 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 santralında kullanılır. Gerçekte şekilde verilen soğutma kademeleri daha fazladır. Bu kademeleri gösterir basit bir şema şekil 4. te görölmektedir. Bu tür sıvılaştırma sistemlerinde yatırım maliyeti daha dışüktür.

Şekil 2. Klasik kaskad LNG sistemlerinde çevrimde kademeli soğutma

Şekil 3. Klasik karýık akýşkanlı kaskad sistemi

Sistem farklı akýşkanları kullanma özelliğine sahiptir. Sođutma şartlarına kendini kolay adapte eder. Daha düşük birim güç maliyetine ulaşmak mümkündür. Daha yaygın kullanım alanına sahiptir. USA-Staten Island, Kanada-Montreal, Cezayir-Skikda vb. tesisler örnek olarak gösterilebilir. Tek kompresör ve eşanjör gruplarıyla bu sistemlerde ulaşılacak kapasite klasik kaskad sistemlerine göre daha küçüktür. Bu sistemin bazılarının devreye alınması ve devreden çıkarılması nisbeten daha zordur. Bu soğutma sistemlerine ayrı bir ön soğutma devresi ilave edilerek sistemin

kullanılrlığı artırılmıştır. Bu tür kademeli kaskad sistemleri daha fazla yaygınlık kazanmaktadır.

Tek akýşkanlı kaskad soğutma sistemlerinde ya NG dýşında bir soğutucu gaz kullanılır yada soğutucu gaz olarakta doğal gaz kullanılır. Bu tür kaskad çevrimi açık çevrim olarakta isimlendirilir. Sođutma amacıyla NG kullanılıyorsa tek kompresör yeterlidir. Ancak farklı akýşkan kullanıldığında ikinci bir kompresör kullanılabilir. Bu tür kaskad soğutma sistemine ait şematik bir diyagram Şekil 5. de verilmiştir. Bu diyagrama göre soğutucu akýşkan

Şekil 4. Karışık akışkanlı klasik kaskad sisteminde soğutma kademeleri

Şekil 5. Tek akışkanlı kaskad soğutma çevrimi

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 kısmen 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 kısmı 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 sarfiyatı 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.

3.3. 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 düşünölmüştür. Bu amaçla lüle yerine bir türbin kullanılarak genleşme sağlanabileceği ve bu yolla elde edilen işin kullanılarak kompresörlerin çalıştırılabileceği ve sonuçta sistemin veriminin artacağı düşünölmüştür. 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 genleşmektedir. Bu sistemler diğerlerine nazaran daha esnektir. 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 göröldüğü gibi ana kompresörde sıkıştırılan gaz veya gaz karışımı su ile soğutulduktan sonra T-1 türbininden elde edilen iç ile K-1 kompresöründe sıkıştırılır. Bu gaz yada gaz karışımı bir eşanjörde soğutulduktan sonra T-2 türbininden elde edilen iç ile çalıştırılan K-2 kompresöründe sıkıştırılır. Gaz yada gaz karışımı yeniden bir eşanjörde soğutulduktan sonra T-3 türbininden elde edilen iç ile çalıştırılan K-3 kompresörüyle son kademe olarak sıkıştırdıktan sonra akışkanın bir kısmı T-1 türbininde genleştirilerek E-1 eşanjörüne soğutucu akışkan olarak gelir ve daha sonra ana kompresöre gider. T-1 türbininden geçmeyen akışkanın diğer kısmı

şekil 6. Türbinle genleşme esaslı soğutma çevrimi

E-1 eşanjöründe soğutulduktan sonra T-2 türbininde de genleştirilir. Bu esnada türbinlerden iç elde edilir. T-2 türbininden çıkan gaz veya gaz karışımı E-2 eşanjöründe soğutulduktan sonra T-3 türbininde genleştirilir. T-3 türbininde genleşen 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 basıncılı olarak saflaştırma ünitesinden ön soğutmaya tabi tutulduktan sonra sırasıyla E-1, E-2 ve E-3 eşanjörlerinden geğererek 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.

3.4. 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 geğerleşir. 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 basıncıta 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 genleşirken rejeneratörden sabit hacimde ısı çekilir. Bir taraftan sürekli olarak gelen doğal gazın bu şekilde sıvılaştırma işlemi tamamlanır. LNG tesislerinde kullanılan soğutma çevrimleri için yapılan gruplamada her grupta kendi içinde bazı farklılıklar arzeder. Bu sistemler üzerinde yapılan geliştirme faaliyetlerinin sonucudur. Pratikte görülen aksaklıklar araştırmalar neticesinde zamanla giderilmekte ve benzer sistemlerle bazı farklılıklar oluşurmaktadır. İkinci gruptaki soğutma sistemleri de kendi aralarında birinci gruptakine benzer olarak ayrılabilir. Ancak ana farklılıklara değinildiğinden konunun uzatılmasına gerek görülmemiştir. Bir LNG sistemi seçiminde başlangıçta da değinildiği gibi çalışma şartlarının iyi tesbit edilmesi ve bu şartlara uygun sistemler arasında verim ve ekonomiklik faktörleride gözönüne alınarak seçim yapılması gerekir. İlk yatırım masraflarının fazla olması önemli bir faktör olduğunda sistemin kapasitesine göre verim ve ekonomik şartlara uygun optimum çözüm aranmalıdır.

4. 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. Doğal gaz ya atmosfer basıncında -161 °C sıcaklıkta yada basıncı altında daha yüksek sıcaklıklarda depolanabilir.

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. Metalik tankların yapımı daha

şekil 7. Stirling soğutma çevrimli soğutma makinası çevrimi

ucuzdur ancak beton duvarlı tanklar emniyet açısından daha güvenlidir. Özellikle yerleşim merkezleri ve hava alanları yakınlarında beton duvarlı tanklar tercih edilmelidir.

Depo içerisinde buharlaşacak doğal gaz miktarını LNG tankı ile çevresi arasındaki ısı alışverişi 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. Anlaşılacağı 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 gradyeninin gelişimini Şekil 8. de görmek mümkündür. Burada donmuş topraklı depolama tankında 3 haftadan 10 haftaya kadar olan sıcaklık gradyeninin dağılımı verilmektedir. 10. hafta sonunda tank içindeki sıcaklık -161 °C iken, 9 m derinlikte sıcaklık -17.8 °C değerine kadar düşmektedir.

5. LNG`NİN NAKLI

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 denizasıırı ülkelere taşınmak zorundadır. Boru hattı ile denizasıırı 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 (Yardıı, 1990).

LNG tankerleri depolarının yapımı iki çeşitir:

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

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

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.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kullanımı giderek artan doğal gaz ısınma sanayi yanında önümüzdeki dönemde enerji üretiminde de ağırlığını iyice hissettirecektir. Bu sebepten, arzı 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 Aliağa da yeni LNG tesisleri kurulması için fizibilite çalışmaları sürdürölmektedir. 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 başlanması gerekmektedir.

7. 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

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