

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SÜPERİLETKEN PARÇACIK HIZLANDIRICILARI İÇİN
SOĞUTMA SİSTEMİNİN FİZİĞİ VE İŞLETİMİ**

Nihal Öykü KABUKÇU

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2011**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Nihal Öykü KABUKÇU tarafından hazırlanan “**Süperiletken Parçacık Hızlandırıcıları için Soğutma Sisteminin Fiziği ve İşletimi**” adlı tez çalışması 09/02/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ömer Yavaş
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan: Prof. Dr. Çelik TARIMCI
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ömer Yavaş
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ergun Kasap
Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Orhan ATAKOL
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜPERİLETKEN PARÇACIK HIZLANDIRICILARI İÇİN SOĞUTMA SİSTEMİNİN FİZİĞİ VE İŞLETİMİ

Nihal Öykü Kabukçu

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ömer YAVAŞ

Bu tez çalışmasında, Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri (THM IR-SEL) tesisinde kullanılacak süperiletken RF kaviteilerin çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan helyum soğutma sisteminin fiziği, tasarımı ve işletimi incelenmiştir.

THM IR-SEL tesisinde kullanılacak olan süperiletken kaviteilerin soğutma ihtiyacı belirlenmiş ve buna yönelik olarak bu ihtiyacı karşılayacak olan helyum soğutma sistemi tanımlanmıştır. Alt sistemler detaylıca değerlendirilmiştir. Ayrıca benzer helyum soğutma sistemi kullanan iki örnek laboratuvar (ELBE, Almanya ve ALICE, İngiltere) incelenmiş ve tanımlanan sistemlerle olan benzerlik ve farklılıkları incelenmiştir.

Şubat 2011, 57 sayfa

Anahtar Kelimeler: Parçacık Hızlandırıcıları, süperiletken RF kaviteiler, Soğutma, helyum soğutma sistemi

ABSTRACT

Master Thesis

THE PHYSICS AND OPERATION OF CRYOGENIC SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING PARTICLE ACCELERATORS

Nihal Öykü Kabukçu

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Ömer YAVAŞ

In this study, physics, design and run processes of helium cryogenic system for superconducting RF cavities of THM IR-FEL facility is investigated.

Cryogenic requirements of TAC IR-FEL facility was determined and subsystems were specified which meet to requirements. In addition, cryogenic system of two similar facilities (ELBE, Germany ve ALICE, UK) are investigated and a comparison with TAC IR-FEL is given.

February 2011, 57 pages

Key Words: Particle Accelerator, Superconducting RF Cavity, Cryogenic, Helium Refrigerator System

TEŐEKKÖR

Bu tez çalışmasında destekleri için danıőmanım Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), araştırma görevlisi Avni Aksoy'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), bu konuda gelişmemi sağlayan Christof SCHNEIDER (ELBE, Almanya) ve Shrikant PATTALWAR'a (ALICE, İngiltere) ve ayrıca her aşamada fedakarlık göstererek desteklerini esirgemeyen abim Onur ağlar KABUKÇU ve anneme teőekkör ederim.

Bu tez alıőması, "Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları (DPT2006K-470)" konulu proje tarafından desteklenmiőtir.

Nihal Öykü Kabukçu

Ankara, Şubat 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. SOĞUTMA SİSTEMLERİ İÇİN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLER.....	2
2.1 Giriş.....	2
2.2 Termodinamik Yasaları.....	2
2.3 Düşük Sıcaklıklı Malzemelerin Özellikleri.....	5
2.3.1 Isı kapasitesi.....	5
2.3.2 Entropi.....	7
2.3.3 Entalpi.....	8
2.3.4 Isısal iletkenlik.....	9
3. HELYUM SOĞUTMA SİSTEMİ.....	11
3.1 Giriş.....	11
3.2 Helyum.....	11
3.3 Soğutma Sistemi.....	14
3.3.1 Termodinamik çevrimler.....	17
3.3.1.1 Claude çevrimi.....	17
3.3.1.2 Eşentalpili genleşme.....	18
3.3.1.3 Eşentropili genleşme.....	20
3.4 Soğutma Sisteminin Elemanları.....	20
3.4.1 Soğutucu kutu (cold box).....	23
3.4.1.1 Genleşme türbini (turbo expander).....	22
3.4.1.2 Isı dönüştürücüler (heat exchanger).....	25
3.4.2 Kompresörler.....	27
3.4.3 Yağ pompaları ve yağ arındırma.....	29
3.4.4 Yağ sökücü sistem.....	29
3.4.5 Sıvı helyum dağıtım sistemi.....	30
3.4.6 Transfer hatları.....	33
3.5 Sıvı Azot Soğutma.....	33
3.6 Soğutma Sisteminin Belirlenmesi ve Performansı.....	35
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
5. THM IR-SEL TESİSİ İÇİN HELYUM SOĞUTMA SİSTEMİ.....	38
5.1 Giriş.....	38
5.2 Örnek Helyum Soğutma Sistemleri.....	39
5.2.1 ELBE laboratuvarı (Almanya).....	39
5.2.2 ALICE laboratuvarı (Daresbury, İngiltere).....	44
5.2.3 THM IR-SEL tesisi için soğutma sistemi ve kurulum planı.....	47
6. SONUÇ.....	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 İki termodinamik durum arasındaki adyabatik yollar.....	3
Şekil 2.2 Sıvı helyumun öz ısı - sıcaklık grafiği.....	6
Şekil 2.3 Sıvı helyumun entropi - sıcaklık grafiği.....	7
Şekil 2.4 Helyum entalpi - sıcaklık grafiği.....	9
Şekil 2.5 Helyumun farklı basınç değerlerindeki ısısal iletkenliği – sıcaklık grafiği.....	10
Şekil 3.1 Helyumun faz diyagramı.....	12
Şekil 3.2 Helyum için sıcaklığa karşı basınç, entropi ve yoğunluk grafiği.....	13
Şekil 3.3 Helyum soğutma sisteminin görünümü. 1- Tank, 2- Kompresörler, 3- Yağ arındırma sistemi, 4- Soğutucu kutu, 5- Sıvı helyum saklama kabı (dewar), 6-Taşınabilir dewar, 7- Kurutucu, 8- Silindir toplayıcı ve gaz kutusu 9- Kontrol paneli.....	14
Şekil 3.4 Carnot çevriminin şematik görünümü.....	16
Şekil 3.5 Claude çevriminin şematik görünümü.....	17
Şekil 3.6 Joule-Thomson sıvılaştırıcısının şematik görünümü.....	18
Şekil 3.7 Cold box (Soğuk kutu Linde modeli- L280). Şekil üzerinde 1- Vakum yalıtımı, 2- Isı dönüştürücüleri, 3- 20 K soğurucu, 4- Turbo-expander, 5- Gaz helyum girişi, 6- Sıvı helyum boşaltma, 7- Sıvı azot girişi (ön soğutma)	21
Şekil 3.8 Genleşme türbininin görünümü.....	22
Şekil 3.9 Genleşme türbininin iç yapısı.....	24
Şekil 3.10 Isı dönüştürücüleri için akış diyagramının gösterimi.....	25
Şekil 3.11 Kanatlı tabaka ısı dönüştürücülerinin şematik görünümü.....	26
Şekil 3.12 Dönel vidalı kompresörün görünümü.....	27
Şekil 3.13 Dönel vidalı kompresörlerin çalışma şekli.....	28
Şekil 3.14 Helyum soğutma sistemlerinde kullanılan yağ sökücü system.....	30
Şekil 3.15 Dağıtım kutusu ve transfer hatlarının görünümü.....	31
Şekil 3.16 Sıvı helyum basınç sıcaklık eğrisi.....	32
Şekil 3.17 Azot sıvılaştırma işlemi için diyagram.....	34
Şekil 5.1 9-hücreli Tesla kavitesinin şekli.....	39
Şekil 5.2 ELBE soğutma sistemi.....	40
Şekil 5.3 ELBE Laboratuvarının yerleşim planı.....	41
Şekil 5.4 ELBE Işınım Tesisinde kullanılan soğutucu kutu ve transfer hattı.....	42
Şekil 5.5 ELBE Işınım Laboratuvarında kullanılan kompresörler.....	43
Şekil 5.6 ALICE hızlandırıcı sistemi.....	45
Şekil 5.7 Soğutma sisteminin şematik görünümü.....	46
Şekil 5.8 THM IR-SEL Laboratuvarı zemin kat yerleşim planı.....	57
Şekil 5.9 Helyum soğutma sisteminin şematik görünümü.....	50
Şekil 5.10 THM IR-SEL tesisi için helyum soğutma sisteminin diyagramı.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Helyum ve sıvı azotun karşılaştırılması.....	11
Çizelge 3.2 Genleşme türbini için farklı model seçenekleri.....	24
Çizelge 3.3 Linde ve Airliquid firmalarının soğutucu ve sıvılaştırıcı performansları..	36
Çizelge 5.1 ELBE, ALICE ve THM IR-SEL Laboratuvarları için parametreler.....	53

1. GİRİŞ

Süperiletken teknolojisine dayalı parçacık hızlandırıcılarının çalışabilmesi için, süperiletken malzemelerin gerekli çalışma sıcaklığına inmesi gerekmektedir. Bu düşük sıcaklık değerlerinin elde edilmesinde kullanılan teknoloji soğu bilim (cryogenic) olarak adlandırılır. Hızlandırıcı sistemlerde kullanılan süperiletken kaviteler bu teknolojiye ihtiyaç duyar. Soğutma sistemlerinde temel olarak kullanılan malzemeler oksijen, hidrojen, azot ve helyum olmasına rağmen hızlandırıcı sistemlerde sadece helyum ve azot kullanılmaktadır. Bu konuda yaptığım araştırmalar, soğutucu sistemlerin çalışma prensibi, soğutucu sistemde yer alan elemanlar, dünyadan iki örnek ve bir soğutucu sistem tasarımı tezin kapsamını oluşturmaktadır.

Başlangıç olarak soğutma sisteminin fiziği olan termodinamik konusu ele alınmıştır. Termodinamik konusu soğutma sistemleri açısından incelenmiş ve entropi, entalpi gibi kavramlar bu sistemler düşünülerek açıklanmıştır.

Bir üst aşamada süperiletken hızlandırıcı sistemlerin temel akışkanı olan helyum incelenmiştir. Helyumun tercih edilme sebebi açıklanmış ve soğutma sistemi parçalarının çalışma prensibini açıklayan çevrimlerden bahsedilmiştir. Daha sonra helyum soğutma sistemini oluşturan makineler ele alınmış ve çalışma prensiplerine değinilmiştir. Ayrıca bölümün sonunda soğutma sisteminin belirlenmesinde nasıl bir yöntem inceleneceği verilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, süperiletken hızlandırıcı kavite kullanan iki ayrı laboratuvar, ELBE (Almanya) ve ALICE (İngiltere) incelenmiştir. Bu tesislerin soğutma sistemlerindeki parçalar, sahip oldukları çevrim anlatılmış ve soğutma sistemleri arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Bu iki örnek tesis anlatıldıktan sonra kurulum çalışmaları sürdürülen Türk Hızlandırıcı Merkezi Infrared Serbest Elektron Lazeri (THM IR-SEL) tesisi için soğutma ihtiyacı hesaplanmış, kullanılması düşünülen helyum soğutma sistemi anlatılmış, buna yönelik olarak bir tasarım yapılmıştır.

2. SOĞUTMA SİSTEMLERİ İÇİN TERMODİNAMİK ÖZELLİKLER

2.1 Giriş

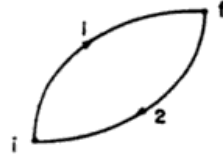
Termodinamik enerji bilimi olarak tanımlanmaktadır ve sistemler arasındaki enerji geçişi üç şekilde meydana gelmektedir. Bunlar, ısı, iş ve kütle akışıdır. Bir sisteme ısı aktarırsa, bu sistemdeki moleküllerin enerjileri artmakta ve iç enerjide artış olmaktadır. Benzer şekilde eğer bir sistem iş yaparsa, o sistemin enerjisi azalmakta ve ters durumda sisteme bir iş yapılırsa, bu sistemin enerjisini arttırmaktadır. Kütle akışı ise beraberinde enerji taşımaktadır ve bu sistemin enerjisini arttıran bir faktör olmaktadır (Pınarbaşı A., 2008).

2.2 Termodinamik Yasaları

Termodinamik ilke ve kavramlar, soğu bilim teknolojisi için temel öneme sahiptir. Termodinamik yasaları, soğutma teknolojisinde kullanılan akışkanların özelliklerinin hesabında ve soğutucu-sıvılaştırıcı sistemlerin performansını ele almada temel oluşturur.

Termodinamiğin sıfıncı yasası; iki ayrı cismin bir üçüncü cisimle ısı dengede olması durumunda, birbiri ile de ısı dengede olduklarını belirtir. Üçüncü cisim termometre olarak düşünürsek, bu yasa her ikisi de aynı sıcaklık değerine sahip iki cisim birbirleriyle temas etmeseler bile ısı dengededir şeklinde ifade edilebilir.

Termodinamiğin birinci yasası; enerjinin korunumu olarak da bilinir. Enerji yaratılamaz ya da yok edilemez, sadece şekil değiştirir. Örneğin, belli bir yükseklikte olan bir cismin gravitasyonel potansiyel enerjisi vardır ve bu cisim aşağı düşerken bu potansiyel enerji, kinetik enerjiye dönüşür. Yani enerji yok olmamıştır sadece şekil değiştirmiştir. Bir sistemin iç enerjisindeki artış; sisteme verilen ısı ile sistemin çevresine uyguladığı iş arasındaki farktır.



Şekil 2.1 İki termodinamik durum arasındaki adyabatik yollar

$$Q = E_f - E_i + W \quad (2.1)$$

Burada E, iç enerjidir. İç enerjiyi açıklamak istersek; enerjinin biçimleri sistemin moleküler yapısıyla alakalıdır. Moleküler aktivitenin derecesi, mikroskobik enerji olarak adlandırılır ve enerjinin tüm mikroskobik biçimlerinin toplamına iç enerji denir.

Bu yasa kısaca, adyabatik (ısı ve kütle kaybının ya da kazancının olmadığı süreçler) bir hal değişimi sırasında, sistemin toplam enerji değişiminin net işe eşit olduğunu belirtmektedir. İlk yasanın uygulaması olarak, iki yol düşünüldüğünde bunlar için ısı ve iş arasındaki farklılık büyüklükçe eşit, işaretçe ters olmalıdır (Şekil 2.1). Böylece, tam bir çevrim için, ısı ve işin toplamı aynı şekilde sıfır olmalıdır. Birinci yasanın daha kullanışlı ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\delta Q = dE + \delta W \quad (2.2)$$

Formüldeki diferansiyel iş, farklı biçimlerde yazılabilir. Bu sistemin tipiyle (sıvı-gaz sistemi, manyetik sistem ya da elektrik sistemi gibi) ilgilidir.

Ayrıca bu yasa, ısı üretimi ya da soğurulması olmaksızın bir noktadan diğerine alınan süreçteki adyabatik yolları tanımlar. Adyabatik yollar için ilk durumdan son duruma sisteme kazandırılması gereken iş, noktalar arasındaki seçilen yoldan bağımsızdır. Bu durumda işin tanımına dikkat etmek gerekirse, sisteme yapılan iş potansiyel enerjideki artmaya eşittir.

Son olarak, hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşirken, tersi olan yönde gerçekleşmemektedir. Birinci yasa hal değişimlerinin yönü üzerinde herhangi bir kısıtlama getirmez, birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşebileceği anlamına gelmez. Bu hal değişiminin olup olmayacağı konusunda birinci yasanın yetersizliği ikinci yasayla kapatılır.

Termodinamiğin ikinci yasaı, ısının iş ve verimliliğe dönüşümüyle ilgilenir. İkinci yasa, ideal bir termodinamik sistemin davranışını tam olarak açıklamak için birinci yasayla alakalı olarak çalışır. Soğuk kaptan, sıcak kaba ısı taşınması, enerji gerektirir. Isı taşınma miktarı, entropi miktarına bağımlıdır.

Termodinamiğin ikinci yasaı için iki ifade bulunmaktadır. İfadelerden biri Kelvin-Planck ifadesi olup, termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin, yalnızca bir kaynaktan ısı alıp net iş üretmesi olanaksızdır, denmiştir. Başka bir şekilde ifade etmek istenirse, bir ısı makinesi sürekli çalışabilmek için hem yüksek sıcaklıktaki kaynakla, hem de düşük sıcaklıktaki kuyuyla ısı alışverişinde bulunmak zorundadır.

Bir diğer ifade ise, Clausius ifadesidir. Bu ifadeye göre, termodinamik çevrim gerçekleştirerek çalışan ve düşük sıcaklıktaki bir cisimden aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki bir cisme aktarmak dışında hiçbir enerji etkileşiminde bulunmayan bir makine tasarlamak olanaksızdır. İfade, ısının soğuk cisimden sıcak olan cisme aktarılmasının yanında, bir de iş biçiminde bir miktar enerji tüketilmesi gerektiğini vurgular.

Bu iki ifade termodinamiğin ikinci yasaı olarak kullanılmaktadır ve eşdeğer ifadelerdir, bu yüzden bu ifadelerden herhangi birine aykırı olan çevrim ya da makine diğerine de aykırıdır.

Termodinamiğin üçüncü yasaı, bir maddeyi mutlak sifira kadar soğutmanın neden mümkün olmadığını belirtir. Sıcaklık mutlak sifira yaklaştıkça bütün hareketler sifira yaklaşır. Mutlak sıfır da aynı şekilde sıfır olan entropiyi tanımlar.

Entropi moleküler rastgeleliğin, yani moleküler dağınıklığın ve herhangi bir anda konumu belirlemedeki belirsizliğin ölçüsüdür. Salınım sıcaklık düşükçe azalır ve mutlak sıfırda moleküller tümüyle hareketsiz olurlar. Bu hal, en üst düzeyde bir moleküler düzeni belirtir. Bu nedenle, sıfır mutlak sıcaklıkta saf kristal maddenin entropisi sıfırdır, çünkü moleküllerin konumunda herhangi bir belirsizlik yoktur. Bu sonuç termodinamiğin üçüncü yasası olarak bilinmektedir. Bu yasa, entropinin hesaplanabilmesi için bir referans noktası oluşturur.

Mutlak sıfırın ulaşılmazlığı, helyum soğutma teknolojisi için temel öneme sahiptir. Soğutucu sistem için üçüncü yasanın uygulaması, eşentropili genişlemeye uğrayan sıvı-gaz sistemidir.

2.3 Düşük Sıcaklıklı Malzemelerin Özellikleri

2.3.1 Isı kapasitesi

Bir maddenin sıcaklığını 1°C değiştirmek için gerekli olan ısı miktarıdır. Başka bir ifade ile bir cismin ısısının sıcaklığına göre türevidir. Cismin kütlesi ile öz ısısının çarpımına eşittir.

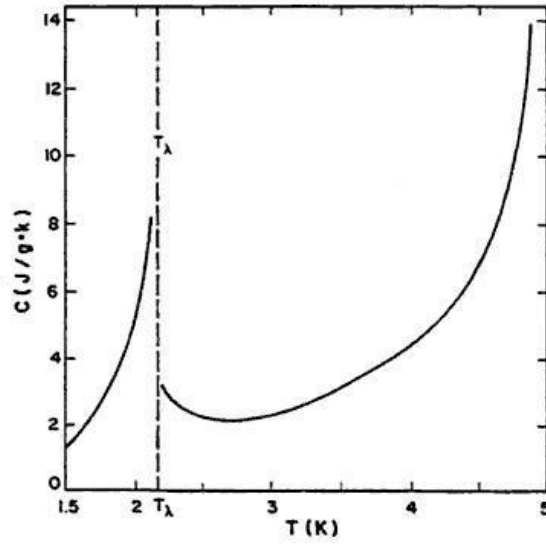
$$Q = mc\Delta T \quad (2.3)$$

Birçok fiziksel özellik gibi ısı kapasitesi de, termodinamik durum değişkenleri bakımından tanımlanır. Isı kapasitesi, ya entalpi (h) ya da iç enerjinin (u) türevi olarak yazılabilir.

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2.4)$$

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2.5)$$

C_p sabit basınçtaki sıcaklıkla entalpideki değişimken, C_v ise sabit hacimdeki sıcaklıkla iç enerjideki değişimdir. Sabit basınçtaki ısı kapasitesi, sabit hacimdeki ısı kapasitesinden her zaman daha büyüktür (Pınarbaşı A., 2008). Bunun nedeni, sistemin sabit basınçta genişlerken yaptığı iş için, fazladan bir enerjinin gerekli olmasıdır. Bu denklemler herhangi bir madde veya herhangi bir hal değişimi için geçerlidirler. İç enerji ve entalpi, taşınan enerji miktarı ile değişmektedirler. Böylece ısı kapasitesi içinde, ısı biçiminde depolanan ya da transfer edilen enerjiyi belirtiyor denilebilmektedir. Şekil 2.2’de sıvı helyumun öz ısı - sıcaklık grafiği görülmektedir. Burada, T_λ , helyum I - helyum II geçiş sıcaklığıdır.



Şekil 2.2 Sıvı helyumun öz ısı - sıcaklık grafiği

Şekil 2.2’ye baktığımızda, sıvı helyum için öz ısı değerinin gittikçe düştüğünü görmekteyiz. Öz ısının tanımı, birim kütlenin sıcaklığını 1 °C değiştirmek için verilmesi gereken ısı miktarına olduğuna göre, helyum için sıcaklık düştükçe bu değişimi yakalamanın daha kolay olduğunu ve daha az ısı vererek daha iyi bir verim elde ettiğimizi görebiliriz.

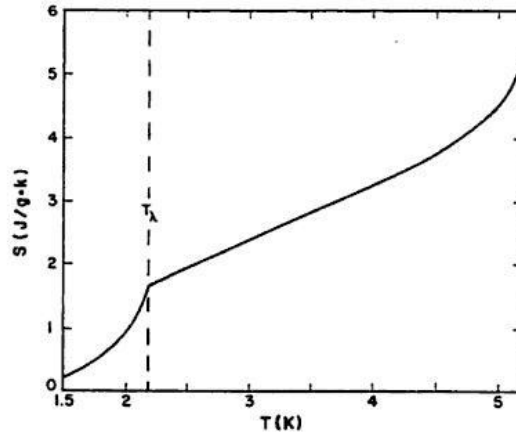
2.3.2 Entropi

Bir sistemin mekanik işe çevrilemeyecek termal enerjisini temsil eden termodinamik birimdir. Sistemlerdeki düzensizlik arttıkça, entropi de artar. Entropinin artması, sistemin kullanılabilir yani faydalı enerjisinin azalması demektir. Örneğin, Bir akışkan ısıtıldığında, molekül hareketleri düzensizleştiği için entropisi artar.

Entropi, tersinir bir yol boyunca değişen durumları ifade eder. Eğer, termodinamik sistem, durumun diferansiyel bir değişimine maruz kalırsa, entropi şu şekilde ifade edilebilir.

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.6)$$

Burada, S entropi, Q ısı ve T sıcaklığı göstermektedir.



Şekil 2.3 Sıvı helyumun entropi-sıcaklık grafiği

Şekil 2.3'de sıvı helyum için entropi-sıcaklık grafiğini görmekteyiz. Burada sıcaklık azaldıkça entropinin gittikçe düştüğünü görmekteyiz. Entropinin büyük olması, sistem için bir dezavantajdır. Örneğin, helyum soğutma sisteminde kullanılan kompresörler, sıvı helyumun ısısal enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek soğutucu kutuyu

desteklerler. Eğer ki, entropi yüksek olursa mekanik enerjiye dönüşen ısı enerjisi miktarı düşer.

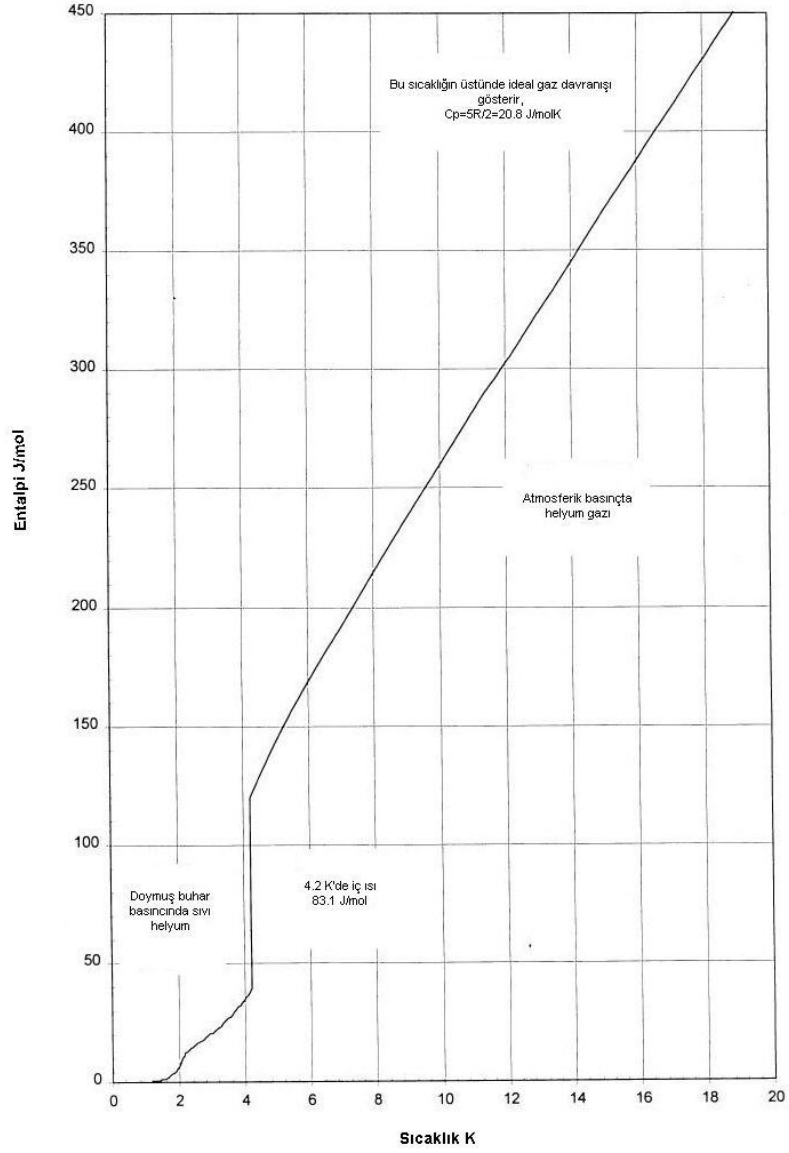
Süreç entropiyi arttırsa, hal değişimleri, herhangi bir yönde değil, sadece belirli bir yönde gerçekleşebilir. Hal değişimi sırasında entropi üretimi sıfırdan büyük olmalıdır, aksi takdirde bu hal değişimi gerçekleşmemektedir. Ayrıca, gerçek sistemler için entropinin korunumu söz konusu değildir. Son olarak, entropi üretimi, sistemlerin verimliliğini saptamak için kullanılabilir. Çünkü entropi arttıkça verim düşmektedir.

2.3.3 Entalpi

Entalpi, bir maddede depolanan her türden enerjinin toplamıdır. İç enerji, moleküllerin gerçek ısısal enerjisidir. Isısal dengede olan kapalı sistemlerde sabittir. Fakat iç enerji, dış enerji kaynaklarıyla bağlantılı olan açık sistemlerde değişebilir. Açık sistemlerde, iç enerjinin gerçek koşullar altında sabit olan enerjinin fonksiyonlarıyla tanımlanması kullanışlıdır. Soğutma işleminde entalpinin en önemli fonksiyonu, sıkıştırma işleminin yapıldığı sistemlerde ortaya çıkar. Burada değişen basınç, değişen hacim ve buna bağlı olarak çevreyle olan enerji değişimi olan ortamda, taşınmayı temsil eder. İç enerji sabit değildir, fakat çevreye bırakılan enerji, diğer dış etkilerin yokluğunda potansiyel enerji olarak davranış gösterir. Bu iki enerjinin toplamı sabittir ve denklem 7 ile ifade edilir.

$$H = U + pV \quad (2.7)$$

Burada H entalpiyi, U iç enerjiyi, p sistemin basıncını ve V ise hacmi temsil etmektedir. Şekil 2.4'te helyumun entalpi-sıcaklık grafiği görülmektedir. Grafiğe göre, 4.2 K'de iç ısı yaklaşık 83 J/mol görülmektedir. Bu değer 1 mol helyum 83.1 J değerinde enerjiye sahiptir. 1 mol helyum, 4 gram olduğundan dolayı buradan 1 gram helyumda yaklaşık 21 J değerinde bir enerji olduğunu söylemektedir. Yani saniyede 1 gramlık helyum, 21 J/s (watt) değerinde bir enerjiye (soğutma gücüne) sahiptir sonucuna varabiliriz.



Şekil 2.4 Helyum entalpi-sıcaklık grafiği (Balshaw, N. H., 1996)

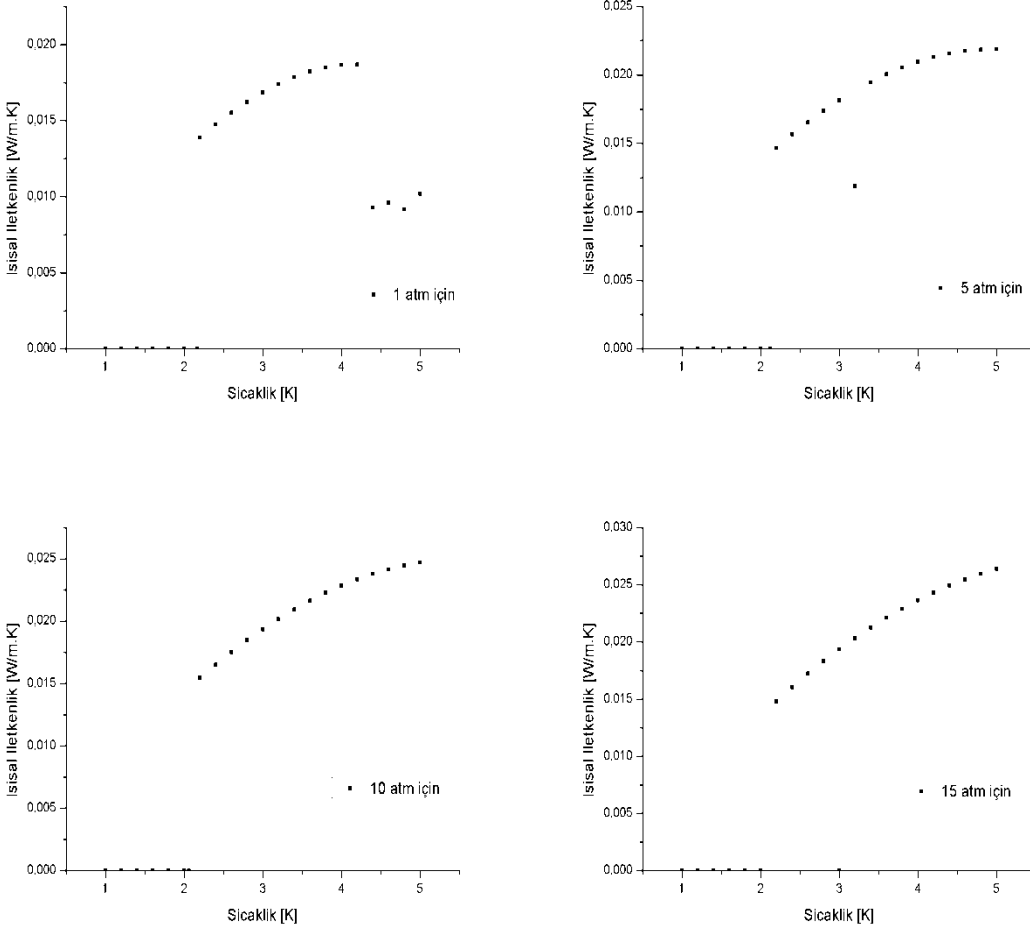
2.3.4 Isısal iletkenlik

Isısal iletkenlik, malzemenin ısı iletim kabiliyetini anlatan bir özelliktir. k harfi ile ifade edilir.

Isı miktarı Q ile tanımlandığında, malzemenin kalınlığı L ve birim zaman t , ısı geçişinin olduğu yüzey alanı A ve ısı geçişine sebep olan sıcaklık farkı ΔT ile ifade edilirse,

$$k = \frac{Q}{t} \times \frac{L}{A \times \Delta T} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir.



Şekil 2.5 Helyumun farklı basınç değerlerindeki ısısal iletkenliği – sıcaklık grafiği

Şekil 2.5'te helyumun sabit basınç değerleri için sıcaklığa karşılık ısısal iletkenlikleri görülmektedir. Grafikte görülen keskin düşüşler λ -geçiş sıcaklığını göstermektedir. Bu değere kadar helyum süper akışkan özelliği göstermektedir ve ısısal iletkenliği sıfırdır. Bu değerden sonraki sıcaklıklarda ısısal iletkenlik sıfırdan farklı olmaya başlamıştır.

3. HELYUM SOĞUTMA SİSTEMİ

3.1 Giriş

Soğutucu olarak kullanılan akışkanlar oksijen, helyum, hidrojen ve azottur. Oksijen ve hidrojen kimyasal tepkimeye girdiklerinden dolayı tercih edilmezken, helyum ve azot soğutma tesislerinde kullanım açısından geniş yer tutarlar. Parçacık hızlandırıcılarında yer alan süperiletken kaviteelerde, azotun kaynama noktası 77 K olduğu için genel olarak ön soğutma işleminde kullanılır. Bu kaviteelerin çalışma sıcaklığı 1.8 K'dir ve bu sıcaklığa ancak helyum soğutma sistemleriyle ulaşılabilir. Çizelge 3.1'de helyum ve azot için yoğunluk, kaynama noktası ve buharlaşma ısısı değerleri verilmiştir. Buharlaşma ısısı soğutucu akışkanların soğutma gücünü belirleyen özelliktir. Örneğin helyum için bu değer 20.9 J/g olarak görülmektedir. Yani 1 g/sn'lik helyum akışının 20.9 J/s (W) değerinde bir soğutma gücü olduğunu görürüz.

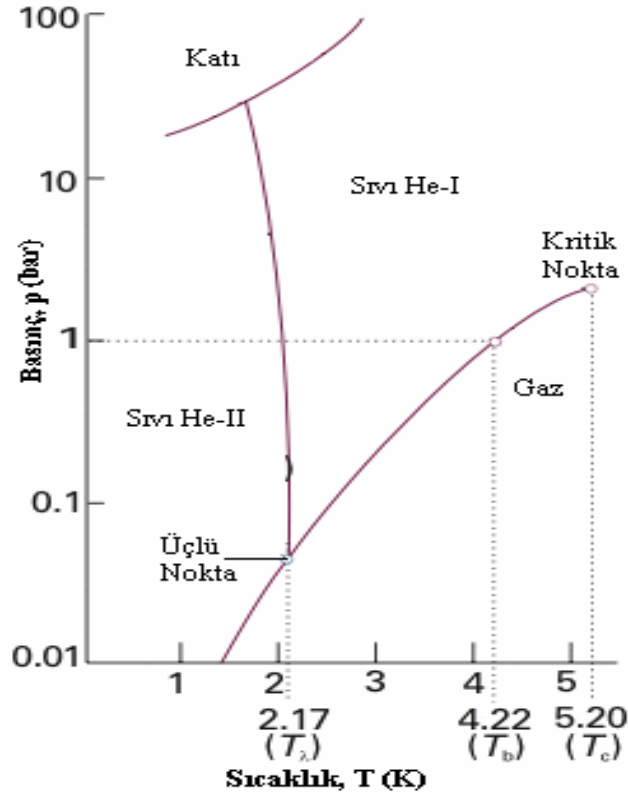
Çizelge 3.1 Helyum ve sıvı azotun karşılaştırılması

	Helyum	Azot
Yoğunluk	0.125 g/cm ³ (Sıvı)	0.808 g/cm ³ (Sıvı)
	1.66x10 ⁻⁴ g/cm ³ (Gaz)	1.16x10 ⁻³ g/cm ³ (Gaz)
Kaynama noktası	4.2 K	77 K
Buharlaşma ısısı	20.9 J/g	198 J/g

3.2 Helyum

Helyum olmaksızın, mutlak sifıra yakın sıcaklıklara ulaşmak imkansız olur. Helyum soy gazların en basitidir. Helyum havada çok azdır. Helyum atomları arasındaki çekim kuvveti zayıftır. Sıvılaştırmak için -268,8 °C' ye (4.2 K) kadar soğutmak gerekir. Başka

hiçbir elementin kaynama noktası bu dereceden düşük değildir. 25 bar basınç altında - 272,2 °C katı hale gelen en hafif gaz helyumdur. Yanıcı olmadığından balon doldurulma işleminde, hidrojen yerine tercih edilir. Helyumun kaynama noktası düşük olduğundan soğutma süreçlerinde kullanılmaktadır.



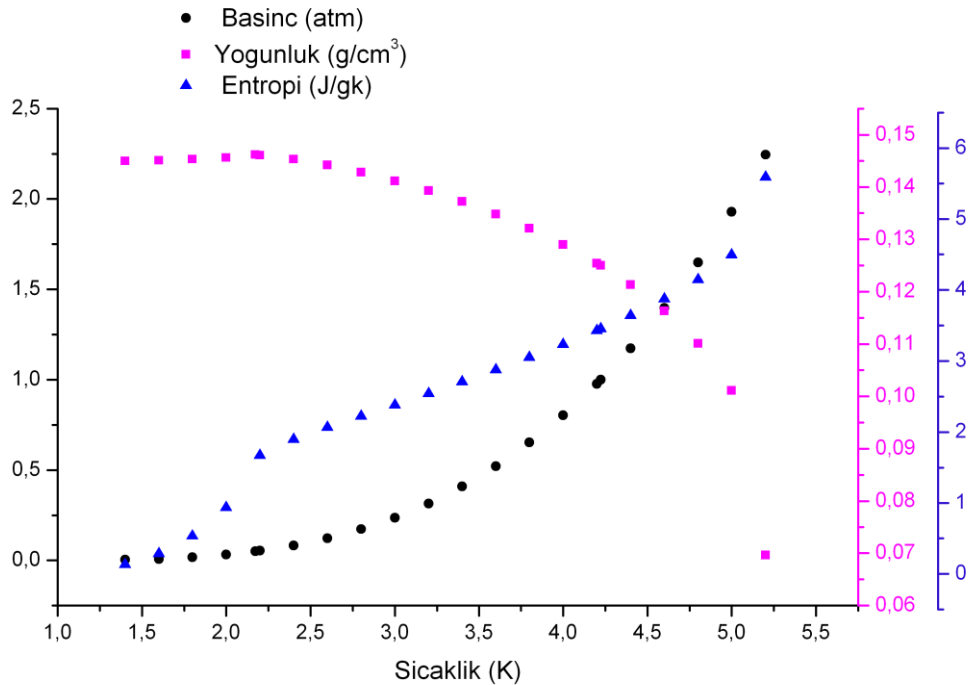
Şekil 3.1 Helyumun faz diyagramı

Helyum renksiz, kokusuz, tatsız ve eylemsiz (tepkimeye girmeyen) bir gazdır. Şekil 3.1’de helyum faz diyagramı görülmektedir. Buna göre helyum 4.2 K’de sıvılaşır ve ancak yüksek basınç (25 bar) altında katılaşır. 2,17 K’nin altında Helyum-4 izotopu üstün akışkan durumuna geçer ve ısıl iletkenliği bakırinkinin bin katı olur. Bu durumdaki helyuma normal akışkan Helyum I’den ayırt edilebilmesi için Helyum II adı verilir. Helyum II olarak adlandırılan süper akışkan durum, tamamen olağanüstü fiziksel özelliklere sahiptir. Bunlardan en çok dikkat çeken özellik taşınma özelliğidir. Termal iletkenliği (yüksek-iletkenli katılardan bile) çok büyüktür ve viskozitesi çok küçüktür.

İki sıvı durumu ayıran çizgi λ -çizgisi olarak adlandırılır. λ -geçiş sıcaklığı, doymuş buhar basıncında 2.172 K'dir.

Evrende hidrojenden sonra en çok bulunan ikinci element olan Helyum yıldızlarda yoğunlaşmış durumdadır. Atmosferin yalnızca %0,0005'ini oluşturur ve demirli göktaşı gibi bazı radyoaktif minerallerde ve mineral yataklarında az miktarda bulunur. Helyum, argon gazının tersine, atmosferde bol miktarda bulunmaz.

%98,2 aralıktaki helyum gazı, doğal gazdan öteki bileşenlerin düşük sıcaklıkta ve yüksek basınç altında sıvılaştırılarak ayrılması yoluyla elde edilir. Soğutulmuş ve etkinleştirilmiş odun kömüründen öteki gazların soğutulması yöntemiyle de %99,995 aralıktaki helyum elde edilir. Şekil 3.2'de helyumun sıcaklığa karşılık gelen, basınç, entropi ve yoğunluk değerlerinin grafiği görülmektedir. Grafiğe göre sıcaklık azaldıkça helyumun basıncı ve entropisi azalırken, yoğunluğu artmaktadır. Entropisinin azalması sistem için avantaj sağlamaktadır. Ayrıca grafikten görüldüğü gibi helyumun sıcaklığını düşürmek için basıncının düşürülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.2 Helyum için sıcaklığa karşı basınç, entropi ve yoğunluk grafiği

3.3 Soğutma Sistemi

Süperiletken RF kavite sistemlerinde kullanılan soğutma sistemi, helyum soğutma sistemidir. Helyum soğutma sisteminin temel elemanları soğutucu kutu (cold box), kompresörler, dağıtım kutusu ve transfer hatlarıdır. Şekil 3.3’de helyum soğutma sisteminin genel yapısı görülmektedir. Sistem ihtiyaca göre değişik şekillerde tasarlanabilmektedir.



Şekil 3.3 Helyum soğutma sisteminin genel görünümü.

1-Tank, 2-Kompresörler, 3- Yağ arındırma sistemi, 4- Soğutucu kutu, 5- Sıvı helyum saklama kabı (dewar), 6- Taşınabilir dewar, 7- Kurutucu, 8- Silindir toplayıcı ve gaz kutusu 9- Kontrol paneli

Şekil 3.3’teki cihazlar tanımlanacak olursa; kompresör ılık helyum gazını yüksek basınca sıkıştırmak için kullanılır. Yağ arındırma sistemi helyum gazından yağı ayırmak için kullanılır. Sıvı helyum saklama kabı, sistemde akış halinde olan sıvı helyumun soğutucu kutun ardından aktarılıp, depolandığı yerdir. Silindir toplayıcı ve gaz kutusu, sıvılaştırılmamış helyumun aktarıldığı yerdir. Ayrıca ısı dönüştürücüleri soğutucu kutu içinde yer almaktadır ve sıkıştırılmış helyumu soğutmada ve geri dönen gazı ılıtmada kullanılır. Genleşme türbini soğutucu kutu içindedir ve helyum gazını kısım kısım soğutmakta kullanılır. J-T vanası helyum gazını kısım kısım sıvılaştırır, helyum gaz tankı tüm sürece girmeden önce helyum gazının depolandığı yerdir. Gaz soğurucu

döngü halinde helyum gazındaki safsızlıkları kaldırır. Gaz saflaştırıcı ve kurutucu sisteme doldurulurken helyum gazının safsızlıklarını ortadan kaldırır (Ganni V., 2009).

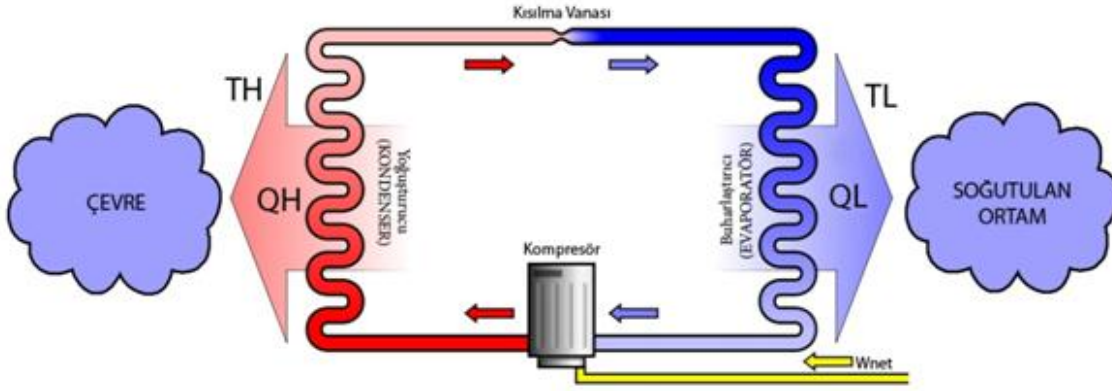
Helyum soğutma sisteminin temel elemanlarını incelemeyen önce, soğutma sisteminde temel olan yapıya bakalım. Tüm termodinamik süreçlerde temel olan çevrim Carnot çevrimidir. Carnot çevrimi, tersinir sabit sıcaklıkta genişleme, tersinir adyabatik genişleme, tersinir sabit sıcaklıkta sıkıştırma ve tersinir adyabatik sıkıştırma olmak üzere dört hal değişimden oluşmakta ayrıca, kapalı bir sistemde veya sürekli akışlı bir sistemde gerçekleştirilebilmektedir. Tersinir hal değişimi, bir yönde gerçekleştikten sonra, çevrede herhangi bir iz bırakmadan tersi yönde gerçekleştirilebilen bir hal değişimidir. Tersinir olmayan hal değişimleri yani sistem ilk durumuna kendiliğinden dönemiyorsa ise, tersinmez hal değişimleridir. Örneğin, sıcak su bir kez soğursa, kaybettiği ısıyı geri kazanıp tekrar ısınması gibi bir süreç kendiliğinden gerçekleşemez yani süreç tersinmezdir. Bu iki süreçte, hal değişiminden sonra sistem tekrar ilk hale dönebilir. Burada ki farklılık, hal değişimi tersinir olursa çevrede net bir değişim olmazken, hal değişimi tersinmez olursa genellikle sistem üzerine bir iş yapıldığı ve bu nedenle ilk haline geri dönemeyeceğidir (Pınarbaşı A., 2008).

Soğutma sistemlerindeki çevrim, ters Carnot çevrimidir. Soğutma sistemi için Carnot çevriminde, gaz halindeki soğutucu madde, izotermal koşullarda sıkıştırılır ve J-T vanasına (kısıma vanası) ulaşana kadar ısı dönüştürücülerinde soğutulur. Kısıma vanasına geldiğinde genişleme oranı artar ve böylece daha fazla soğur.

Kısıma vanasında gerçekleşen süreç Bernoulli ilkesine dayanmaktadır. Bu ilkeye göre boru çapı küçüldükçe akışkanın hızı artar ve basıncı düşer. Bernoulli ilkesi, enerjinin korunumu prensibinden elde edilmektedir.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 = \text{sabit} \quad (3.1)$$

Bu denklem türetilirken, viskoz etkisi ihmal edilmiş, akış durgun ve sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Ayrıca bağıntı laminer akış boyunca uygulanabilir.



Şekil 3.4 Carnot çevriminin şematik gösterimi

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi akışkan ilk başta kompresörde sıkıştırılır ve soğutulur. Ardından yoğunlaştırıcıya gelir. Burada çevreye ısısını vererek sıvılaştırılır. Ardından kısılma vanasında, kısılmanın etkisiyle basıncı, sıcaklığı büyük ölçüde düşer ve son olarak soğutmak istediğimiz ortama gelir. Ortamdaki ısıyı çeker ve buharlaşır. Ardından tekrar kompresöre gelir. Çevrim bu şekilde bir döngü halinde devam eder. Şekil 3.4'te Q_L ortamdaki çekilen ısı yani soğutma gücü, Q_H ortama verilen ısı, T_L ortamın düşürüldüğü sıcaklık, T_H hava sıcaklığı, W_{NET} ise kompresöre verilen enerjidir. Örneğin, buzdolabında, soğutucu akışkan tarafından ısının alındığı dondurucu bölüm, buharlaştırıcı işlevini görür. Buzdolabının arkasında bulunan ve ısının akışkandan çevreye geçmesine yarayan borular yoğunlaştırıcı görevi görürler. Soğutma sistemlerinin çevrimleri için etkinlik katsayısı (Coefficient of Performance, COP) yani süreci gerçekleştirebilmeleri için sahip olmaları gereken katsayı,

$$COP = \frac{\text{Soğutma gücü}}{\text{Sisteme sağlayan enerji (İş girişi)}} = \frac{Q_L}{W_{net,g}} \quad (3.2)$$

Bu ifade, soğutma sistemlerinin verimini göstermektedir. Payda ki ifade elde edilmek istenen değeri temsil ederken, paydada ki ifade ise harcanması gereken değeri göstermektedir. Burada $W_{NET,g}$ sisteme giren iş gücüdür ve

$$W_{net,giren} = Q_H - Q_L \quad (3.3)$$

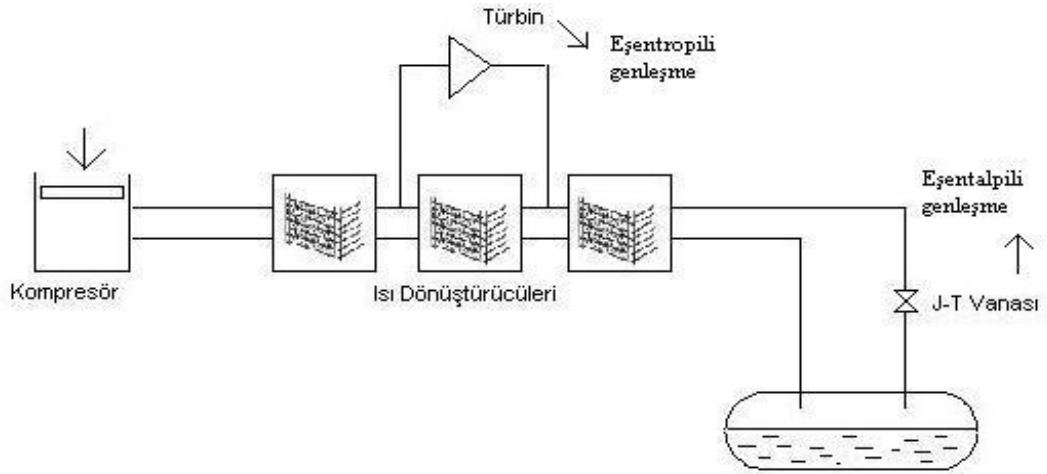
şeklinde ifade edilmektedir.

Akışkanlarda soğutma işlemi, genişleme ile elde edilir. Soğutucu sistemlerde iki tip genişleme yöntemi vardır. Bunlar, eşentropili ve eşentalpili genişlemedir. Eşentropili genişlemede, akışkan iş yapar ve entropisini sabit tutarak genişler. Bu genişleme için en iyi yöntemdir. Çünkü verilen basınç değişimi üzerinde en büyük sıcaklık değişimini üretir. Eşentalpili genişlemede ise, ısı transferi olmadan basınç değişimi gerçekleşir. Bu yöntem, kullanımı kolay olduğu için soğutma sistemlerinde genel uygulamalarda vardır. Bununla birlikte, düşük termodinamik verimliliğe sahiptir. Çünkü ideal olmayan tersinmez süreçlere yol açar.

3.3.1 Termodinamik çevrimler

3.3.1.1 Claude çevrimi

Helyum soğutma ve sıvılaştırma sistemlerinin nasıl çalıştığını anlamak istersek, Claude çevrimine bakmamız gerekir. Claude çevrimi, termodinamik çevrimlerin birleşmesinden meydana gelmektedir. Eşentropili ve eşentalpili çevrimlerin birleşimidir. Bu çevrimde kompresör, ısı dönüştürücü, türbin ve J-T vanası vardır.



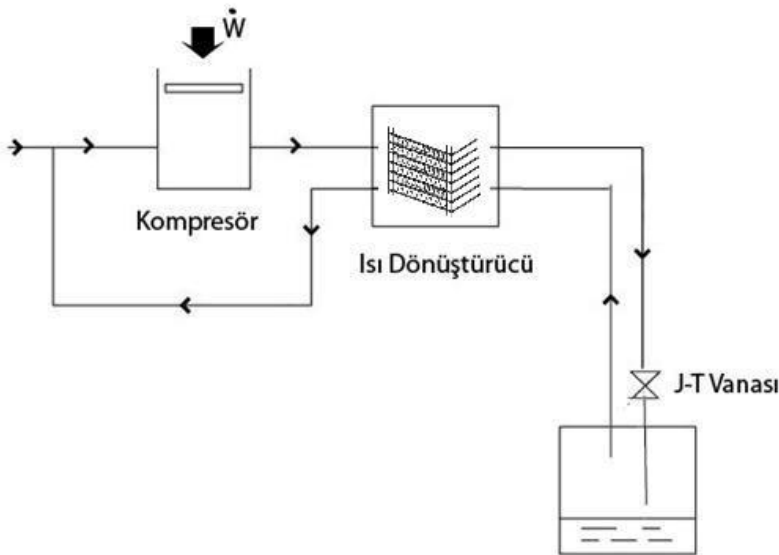
Şekil 3.5 Claude çevriminin şematik görünümü

Şekil 3.5'te Claude çevriminde yer alan elemanlar görülmektedir. Burada yer alan türbinlerde eşentropili genleşme gerçekleşirken, J-T vanalarında ise eşentalpili genleşme gerçekleşmektedir. Türbinde gazın bir kısmı genişletilmek için kullanılır ve soğutulur. Türbinden çıkan akış, ısı dönüştürücüler sayesinde ana gaz akışını ön soğutmada kullanılmaktadır. Ön soğutma işleminden geçen ana gaz akışı, türbinlerde eşentalpili genleşme ile daha da soğutulur.

3.3.1.2 Eşentalpili genleşme

Basınç ve sıcaklıkta değişim olurken, çevreden ısı alınma ya da çevreye ısı verme işlemi olmaması ya da akışkanın kinetik enerjisinde değişim olmaması anlaşılmalıdır. Akışkan bu süreçte basınç düşümesine maruz kalarak, entalpi değişimi olmaksızın genişler.

Eşentalpili genleşme genel olarak Joule-Thomson etkisi olarak adlandırılır (Şekil 3.6). Joule-Thomson etkisi, soğutucu akışkanların sıvılaştırılmasında kullanılan ilk metotlardan biridir. Metot, bir valf boyunca oldukça büyük basınç düşüşünü devam ettirebilen akışkanın eşentropili genişmesini içerir. Tanımlama olarak, akışkan iş yapmamıştır ve süreç adyabatiktir fakat tersinmezdir (Van Sciever, S. W., 1986).



Şekil 3.6 Joule-Thomson sıvılaştırıcısının şematik görünümü

Eşentalpili genişlemenin anlamı, vanaya gelen akışkanın öz entalpisi, daha büyük basınçta olan akışkanın öz entalpisinde eşit olmalıdır. Joule-Thomson etkisiyle soğutma gerçekleştirebilmek için Joule-Thomson katsayısının pozitif olması gereklidir. Kısılma işleminde akışkanın sıcaklığındaki değişim, J-T katsayısı ile verilir.

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (3.4)$$

Diğer bir ifadeyle, bu katsayı sabit entalpide bir hal değişimi sırasında sıcaklığın basınçla nasıl değiştiğinin ölçüsüdür. Bununla birlikte, bu katsayı, gerçek gazlar için pozitif ya da negatif olabilir. Joule-Thomson etkisinde yani sıvılaştırma işleminde iki önemli eleman vardır: ısı dönüştürücüleri ve J-T vanasıdır. Kompresör sistemi ise J-T sıvılaştırma işlemine ek olarak giren makinelerdir. J-T vanası, yüksek basınçlı akışın eşentalpili genişmesinde rol oynar. Isı dönüştürücüleri, yüksek ve düşük basınçlı gazlar arasında ısı alışverişini sağlar. Soğu bilim sisteminin termodinamik dilinde, ısı dönüştürücüler entalpiyi korumak için düşünülmüştür.

J-T vanaları boyut olarak küçük yapıda olduklarından, ısı geçiş alanı küçüktür ve buda süreci adyabatik yapmaktadır. Ayrıca vanalarda bir iş yapılmaz ve potansiyel enerji değişimi de küçüktür. Bu vanalarda giriş ve çıkış hızı çok farklı olsa da merteye açısından küçük bir değerde olduğu için kinetik enerji ihmal edilmektedir. Sonuç olarak enerji korunduğu için, entalpi sabittir ve süreç eşentalpilidir diyebiliriz. Giriş ve çıkış entalpileri eşit olduklarına göre, iç enerji (U) ve akış enerjisi (PV) toplamı eşittir. Biri artarken diğeri azalmaktadır. İç enerjinin artışı, PV değerinin azalması ve sıcaklığın artması anlamına gelmektedir. PV değerinin azalması ise, sıcaklığın düşmesini sağlamaktadır.

Isı dönüştürücüleri, J-T vanası ve sıvı veriminin kombinasyonu için entalpinin korunumu,

$$\dot{m}h_2 = (\dot{m} - \dot{m}_1)h_1 + \dot{m}_1h_1 \quad (3.5)$$

Burada, \dot{m}_1 sıvı kütle akış oranı ve h_1 sıvının öz entalpisidir. Verim ya da sıvılaştırma bölümü $y = \dot{m}_1/\dot{m}$ olarak tanımlanırsa, bu değer için verilen ifade,

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_1} \quad (3.6)$$

olur. Bağlıtından sistemin veriminin entalpiler arasındaki farklılık olduğunu görülmektedir.

3.3.1.3 Eşentropili genişleme

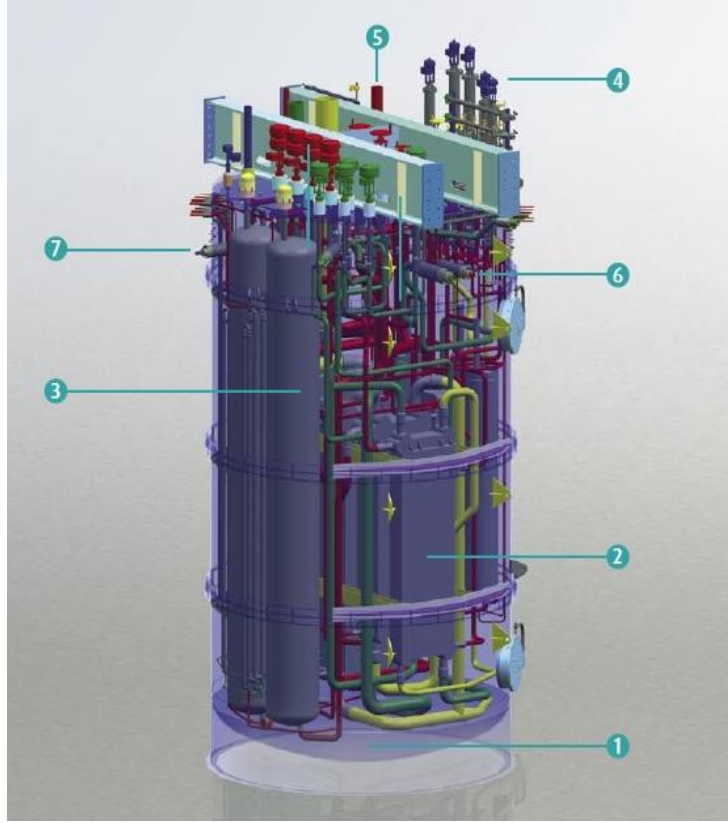
Eşentropili genişleme, entropinin sabit olduğu adyabatik ve tersinir süreçlerdir. Gerçek hal değişimi, eşentropili hal değişimine ne kadar yakın olursa, sistemin çalışması da o ölçüde iyi olmaktadır. Soğutma her zaman, makinedeki akışkanın genişleme süreciyle üretilebilir ve iş yapılmasına sebep olur. Çevre sıcaklığında izotermal olarak sıkıştırılan gaz ısı dönüştürücülerinde soğutulur. Daha fazla soğutma, iş üreten genişleme sürecinde gerçekleşir. Örnek olarak, kompresörler için eşentropili genişlemenin verimi, bir gazı, istenilen basınca eşentropili hal değişimi ile sıkıştırmak için gerekli olan işin, gerçek işe oranlanması ile bulunmaktadır. Sıkıştırma işlemi sırasında gaz soğutulmadığı zaman işlem adyabatiktir ve eşentropili hal değişimi gerçek sistem için iyi bir örnek oluşturur. Fakat kompresörü soğutulmak istenirse, bu durumda eşentropili hal değişimi model olarak seçilemez, çünkü artık süreç adyabatik değildir.

Pratikte bu genişleme hiçbir zaman eşentropili değildir. Çünkü entropinin değişmediği sistemler ideal sistemler olmaktadır.

3.4 Soğutma Sisteminin Elemanları

3.4.1 Soğutucu kutu (cold box)

Soğutucu kutu, bütün soğutma işlemlerinin gerçekleştirildiği kısımdır ve bileşenlerinin tümü ortam sıcaklığının altında çalışmaktadır. Bu yüzden bu bileşenler termal olarak yalıtılmaya ihtiyaç duyarlar.



Şekil 3.7 Soğutucu kutu (Cold box, Linde modeli- L280).

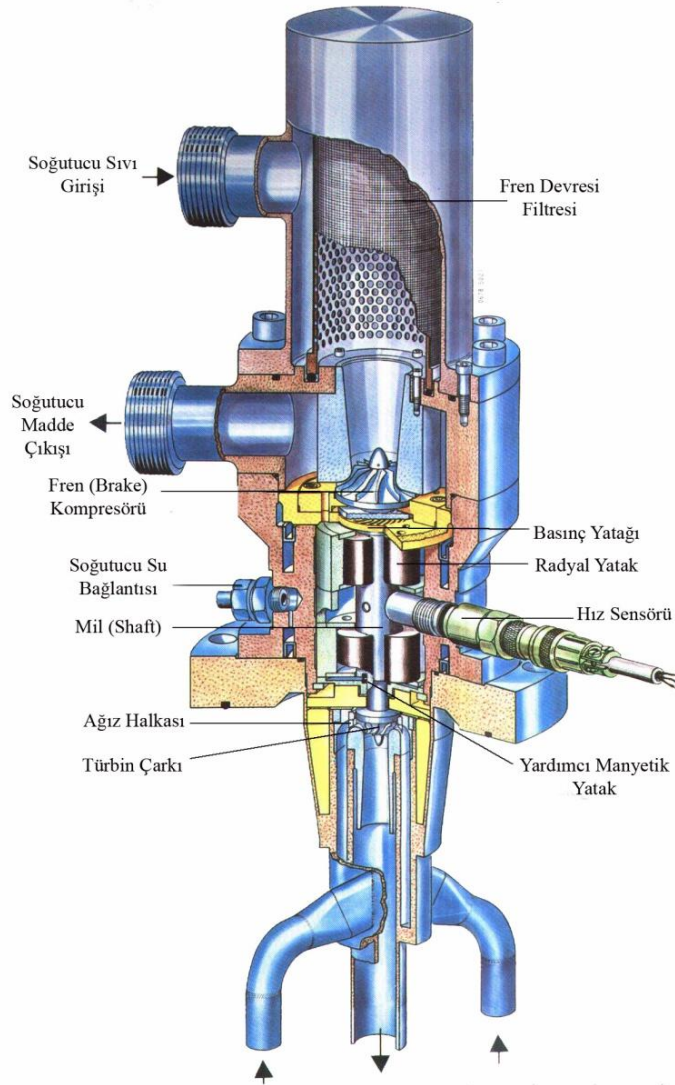
1- Vakum yalıtımı, 2- Isı dönüştürücüleri, 3- 20 K soğurucu, 4- Turbo expander, 5- Gaz helyum girişi, 6- Sıvı helyum boşaltma, 7- Sıvı azot girişi (ön soğutma)

Ana bileşenleri genişleme türbini (turbo expander) , Joule-Thomson vanaları ve ısı dönüştürücüleri (heat exchangers) dir. Soğutucu kutunun içinde yer alan elemanlardan biri de, soğuruculardır. Bu cihazlar, 80 K ve 20 K sıcaklık seviyelerinde yerleştirilir ve helyum akışından azot, oksijen vb. kalıcı gaz kalıntılarını kaldırmakta kullanılırlar. Genleşme türbinleri ve ısı dönüştürücüler için akış sürecinin temiz kalmasını sağlarlar. Soğutucu kutunun performansı bu elemanlara bağlı olarak değişir. Soğutucu kutudan çıkan helyum gazı 4 K sıcaklığındadır.

Soğutucu kutularda ön soğutma sistemi isteğe bağlı olarak bulunur. Ön soğutma sistemi azotla sağlanır ve sistemin verimini de vazgeçilmez bir role sahiptir.

3.4.1.1 Genleşme türbini (turbo expander)

Soğutma sisteminde kullanılan genleşme cihazı türbinlerdir. Genleşme türbini boyunca, gazın genişmesi ile soğutma işlemi gerçekleştirilir ve bu işlem sırasında entalpi de azalma olur. Türbin içindeki eşentropili genleşme, basıncın azalmasıyla, geniştirilen soğutucu akışkanın daha düşük sıcaklıklara düşmesine izin verir.



Şekil 3.8 Genleşme türbininin görünümü (Turner, S., 1995)

Yüksek basınçlı soğutucu gaz türbin içinde akar, daha sonra akışkan türbin ağız (nozzle) ve bıçakları (blade) boyunca genişletir, mil (shaft) döner ve soğutma gerçekleştirilmiş olur. Genleşme türbinini oluşturan bileşenler türbin çarkı, türbin ağız ve dağıtıcı, mil, fren kompresörü, çark mil yatağı ve eksenel basınç yatağıdır.

Genleşme türbinlerinin iki ana bileşeni, türbin ve kompresördür. Burada, türbin güç ünitesi ve kompresör sürücü ünitesidir. Yüksek basınçlı gaz, iş üretmek için genişler ve kompresöre sürülür. Çünkü iş, genişleyen yüksek basınçlı gazdan çıkar. Bu genleşme eşentropilidir ve türbinden düşük basınçla boşalan gaz, çok düşük sıcaklıkta olur.

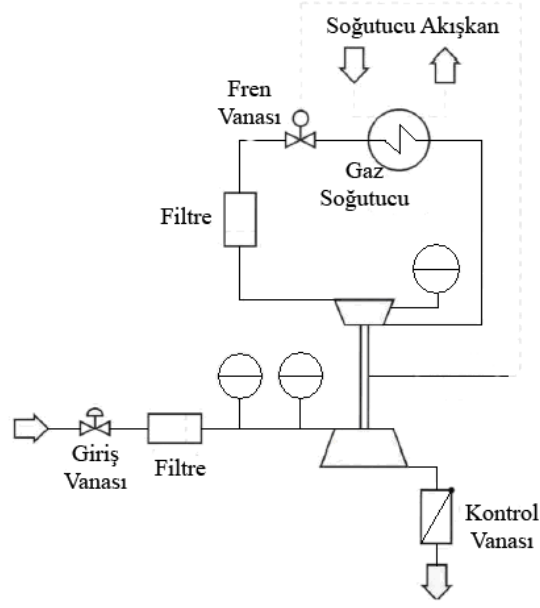
$$\text{Hız oranı} = \frac{U}{\sqrt{2\Delta h_{\text{ideal}}}} \quad (3.7)$$

Eşitlik 15’de gördüğümüz değer fren kompresörün hızını göstermektedir. Bu değer, genleşme türbinimizin ne kadar iyi performans gösterdiğinin değeridir (Dixon, S., 2005).

Ortam sıcaklığında çalışan hareketli gaz yatağına sahiptir. Türbin, soğutucu kutunun en üst düzlemine yerleştirilir. Mil yatağı kutusu, türbinin bütünleyici parçası biçimindedir ve soğutucu kutunun vakum boşluğunda kırılma olmaksızın kolayca kaldırılabilir. Dik olarak yönelmiş rotor, alüminyum yapımı disklerle taşınır.

Tüm türbin sistemi süreçle bağlantıdır ve sistem, dinamik gaz yataklarına sahiptir. Manyetik yedek yatak, çalışmaya başlama ve kapatma boyunca rotorun ağırlığını dengelemek için yeterli kuvveti uygular. Çalışma sırasında hiçbir dış yatağa gerek yoktur. Türbin hızı, kompresör gaz çevriminde kontrol vanası ile ayarlanır.

Örnek olarak bir genleşme türbinini inceleyecek olursak, Şekil 3.9’da görülen Linde modeli soğutucu kutuda yer alan bir genleşme türbininin şematik görünümüdür.



Şekil 3.9 Genleşme türbininin iç yapısı

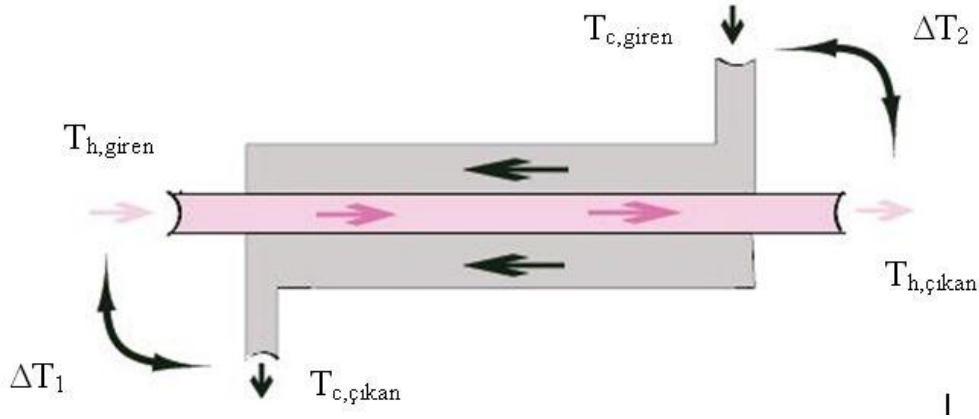
Şekil 3.9’da ki yapıda üst kısım kompresör ortada bir mil kutusu ve altta da türbin olduğu düşünülebilir. Gaz yataklı genleşme türbininde çevrim sırasında çıkan enerji, kompresör çevriminin gaz soğutucundaki su soğutmaya aktarılır. Kompresör çevrimi, genleşme türbininin tüm tipleri için bütünüyle entegre edilmiştir.

Çizelge 3.2 Genleşme Türbini için farklı model seçenekleri

Rotor Yarıçapı	16, 22, 32, 45 mm
Çark Yarıçapı	9 – 45 mm
Helyum için Güç	0.1 – 40 kW
Verimlilik	% 60 – 82
Maksimum Çalışma Hızı	
TGL16	4.800 rps
TGL22	3.650 rps
TGL32	2.500 rps
TGL45	1.900 rps

3.4.1.2 Isı dönüştürücüleri (heat exchanger)

Isı dntrclerinde yapılan i karşılıklı iki akışkan kullanarak, aralarında ısı geii sağlamaktır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, bir yandan soğuk akışkan girerken diğer yandan sıcak akışkan giriyor. Ardından aralarında ısı geii oluyor. Bu ısı geii, temas yüzeyinin kesit alanı (A) ve sıcaklık farkıyla orantılı olmaktadır. Burada kullanılan soğuk akışkan, soğutulan ama sıvılatırılmayan gazdır. Bu gaz, gelen sıcak akışkanı ılıtmak için kullanılır. Isı dönüştürücüler, soğutucu kutuya dikey Şekilde yerletirilmelidirler. Isı dönüştürücüler tasarlanırken, minimum basınç d temel alınmalıdır.



Şekil 3.10 Isı dönüştürücüleri için akış diyagramının gösterimi

Isı dntrclerinde, ısı transferi

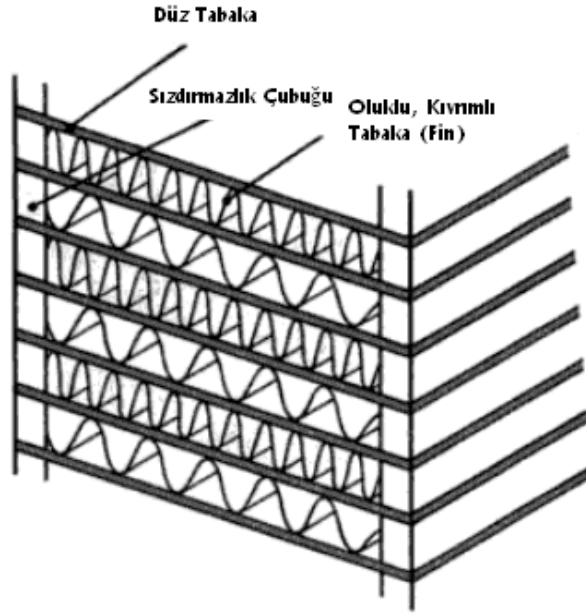
$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_e \quad (3.8)$$

bağıntısı ile veriliyor. Burada U toplam ısı transfer katsayısı, A ısı transfer kesit alanı ve ΔT_e iki akım enerjisindeki değişim arasındaki sıcaklık farkı göstermektedir.

Isı dönüştürücülerin tasarımı soğutucu ve sıvılaştırıcı sistemlerin her ikisi için de oldukça önemlidir. Soğutucular için sıvılaştırıcılara göre ısı dönüştürücünün yüzey alanının daha büyük olması gerekir. Bunun sebebi sıvılaştırıcılarda türbin sayısının daha fazla olmasıdır.

Isı dönüştürücüler alüminyum alaşımından yapılır. Bunun sebebi daha yüksek ısı verimliliğine sahip olmalarıdır. Özellikle kanatlı tabaka ısı dönüştürücüleri (plate-fin heat exchanger) kullanılır. Bunun sebebi düşük sıcaklıkta mekaniksel kararlılık, yüksek basınca dayanabilme yeteneği, daha hafif olma gibi özelliklerinden kaynaklıdır.

Plate-fin ısı dönüştürücüleri, öncelikle gaz-gaz uygulamaları için kullanılır.



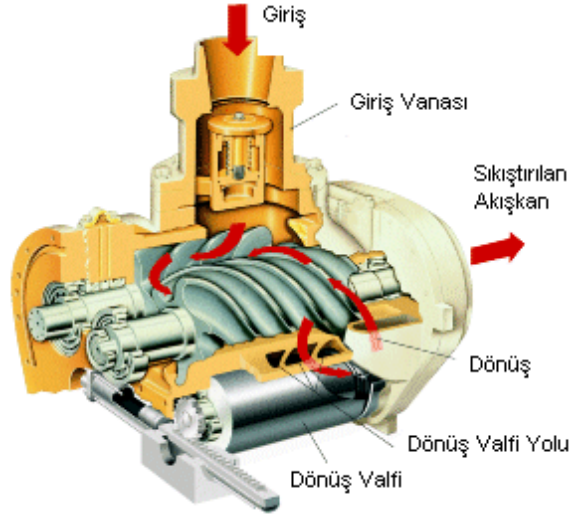
Şekil 3.11 Kanatlı tabaka ısı dönüştürücülerinin şematik görünümü

Akışkanın akış biçimi, kıvrımlı tabakalar arasına sıkıştırılan düz tabakalarla ayrılmıştır. Çok katmanlı parçalar, tabakalar boyunca ya da tabakadan tabakaya iyi bir akış dağılımı sağlamak için bu dönüştürücülerde girişte bulunur. Düz plakalar arasına yerleştirilen kıvrımlı plakalar hem ekstra ısı transferi alanı hem de düz plakalara destek yapısı sağlamak için kullanılır.

3.4.2 Kompresörler

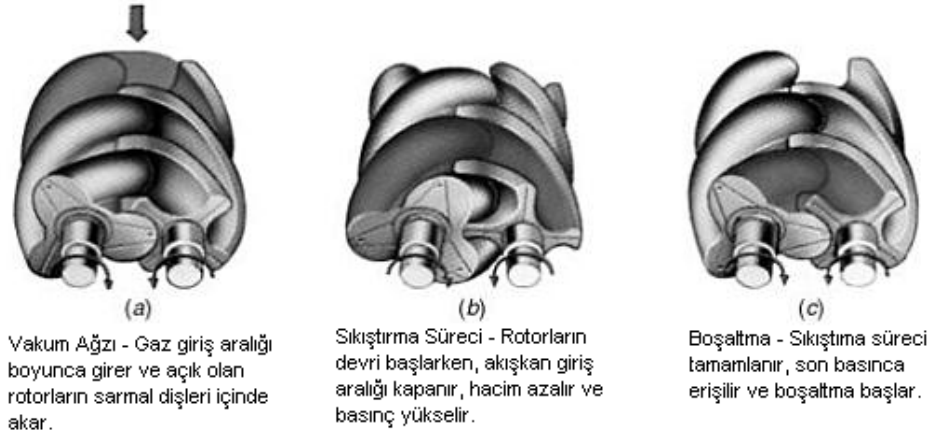
Kompresör, düşük sıcaklıktan çevre sıcaklığına ısı transferi için helyum transferi sağlamaktadır. Kompresör, düşükten yüksek basınca sıkıştırma ile helyum gazının kullanılabilir enerjisini (exergy) mekanik enerjiye dönüştürür.

Kompresör sistemi, pek çok temel alt sistemden oluşur. Bunlar kompresör kızıağı, yağ arındırma sistemi, gaz yönetim sistemi. Kompresör kızıağı, kompresör, katı yağ arındırıcı, yağ soğutucu, yağ çevrim pompası, helyum gaz soğutucu, filtreler, yağ ve gaz yönetim vanaları, motor, ekipman ve kontrol yazılımlarını içerir.



Şekil 3.12 Dönel vidalı kompresörün görünümü

Helyum soğutma sisteminde kullanılan kompresör tipleri, dönel vidalı kompresörler ve vidalı vakum kompresörleridir. Şekil 3.13'te dönel vidalı kompresörlerin çalışma şekli gösterilmektedir. Vidalı kompresörlerin birkaç çeşidi bulunmakla beraber, helyum soğutma sisteminde kullanılanlar, vida bloğunun elektrik motoruyla direkt olarak bağlantılı olan tipidir. Bu sayede iletim (aktarım) kaybı oluşmaz. Dönel vidalı kompresörlerde iki adet vida vardır: dişi ve erkek. Dişi vida iç bükey girişlere ve erkek vida dış bükey sarmal girişlere sahiptir. Dişi vida bir sürücü güç olarak ve erkek vidalara bu güç aktarılarak zıt yönlerde dönerler.



Şekil 3.13 Dönel vidalı kompresörlerin çalışma şekli (Bloch, H.P., 2006)

Soğutucu sistemlerde dört çeşit kompresör kullanılır. Bunlar;

a) **Yüksek-basınç kompresörleri:** Bu kompresör, soğutucu kutuyu beslemek için ılık helyum gazını belli bir basınç değerine sıkıştırır.

b) **Soğuk kompresör:** 4 K seviyesinde kryostattan gelen soğuk gazı sıkıştırmak için kullanılır ve kryostattaki basınç kararlılığını kontrol eder. Soğuk kompresör kullanımı, soğutucu kutunun geri dönüş kısmında ki ısı dönüştürücünün boyutunu küçülmesini sağlar. Ayrıca helyum basıncının dengede tutulmasına yardım etmektedir.

Soğuk kompresör soğutucu kutunun içine yerleştirilir ve ısı dönüştürücüleri, vanaları içermektedir. Genellikle diğer bileşenlerin ısısal ışıyım yükünü engellemek için sıvı azot kalkanyla korunur.

c) **Vidalı vakum kompresörleri:** Soğuk kompresörden gelen gazı, 1 barlık son basınca sıkıştırmak için kullanılır.

Soğuk kompresörle, vidalı vakum kompresörünün görevi aynıdır. İkisi arasındaki seçim sistemin büyüklüğüne ve maliyete bağlıdır. Vakum kompresörlerinde helyum ılık olarak kullanılmalıdır bu yüzden sistemde ek ekipmana ihtiyaç duyulmasına sebep olur. Ayrıca vakum kompresörlerinde ılık helyum kullanılır.

d) **Geri kazanım kompresörü:** Basınç kanalında geri kazanılan gazı tekrar doldurmak için kullanılır (örneğin; tesiste yaşanacak herhangi bir güç arızasından sonra).

3.4.3 Yağ pompaları ve yağ arındırma

Kompresörde kullanılan yağ pek çok amaca hizmet eder. Küçük kısım, mil yatakları ve sızdırmazlık elemanları gibi dönen parçaların yağlanması için kullanılır fakat en önemli bölümü, kompresör parçalarında kullanılan malzemelerin sıcaklık limitleri vardır ve bu sıcaklığı bu limitlerde tutmak için sıkıştırma ısısının soğurulmasında görev alır. Vidalı kompresörlerin bazıları yağ dolaşımını sağlamak için dış yağ pompaları kullanılır ve diğerleri boşaltma basıncı (discharge pressure) kullanır. Bu dış yağ pompaları genellikle kompresörden daha az güvenilirdir ve bunun gibi ek sistem bozulma sürelerine ve ek güç kullanımına yol açar.

Yağ arındırıcının kompresör kızağı üzerine yerleştirilmesi işleme dikkat edilmesi oldukça önemlidir. Helyum taşımada kullanılan kompresörler, yağ arındırma işlemini geliştirmek için katı yağ arındırıcılarında iki filtre (coalescer, havadan suyu ve yağı alan filtreler) içerir. Filtrelerin (Coalescer) boyutları yetersiz olursa, aşırı basınç düşüşlerine (ek çalışma ve bakım maliyeti) sebep olur ve yağ borular üzerinde taşınır (soğutucu kutu için zarar verici), ek yağ çıkarma üniteleri gerektirir. Ek olarak, tekrar sürüklenme gibi bir olayı en aşağı çekmek ve yağ ayırma işlemini maksimize etmek için filtre (coalescer) kanallarındaki dairesel ve eksensel hızları düşük tutmak gereklidir.

3.4.4 Yağ sökücü sistem

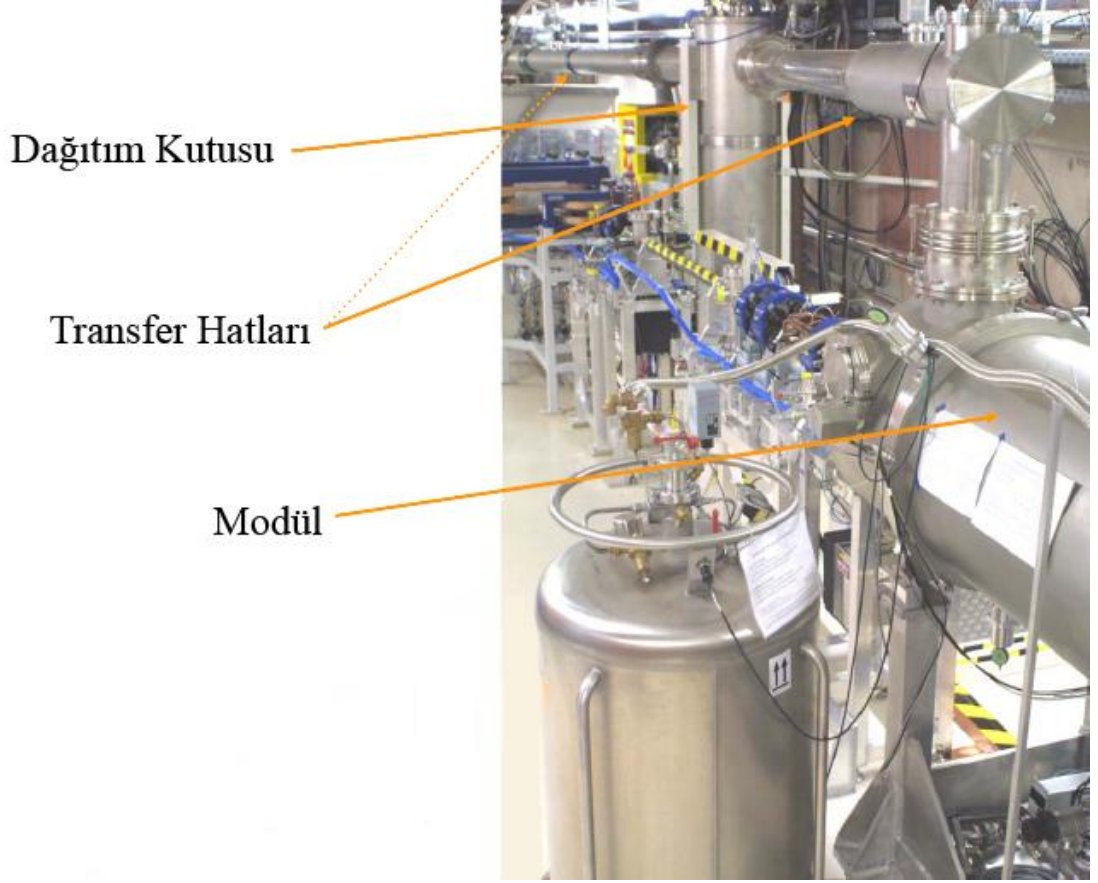
Yağ sökücü sistem, kompresörden gelen helyumu saflaştırmak için kullanılır. Soğutucu kutuya varmadan önce helyum gazından yağ parçacıklarını ve yağ buharının kaldırılmasında rol oynar. Yağın 0,1 ppm'den daha düşük oranlarda olması için art arda yerleştirilmiş üç veya dört tane filtreden (coalescer) oluşan yapıdır. Sonuç olarak gaz aktif karbon soğurucularda filtrelenir ve iz safsızlıkları soğutucuya kutuya girmeden önce helyum akışından ppb (10^{-9}) seviyesinde kaldırılır.



Şekil 3.14 Helyum soğutma sistemlerinde kullanılan yağ sökücü sistem

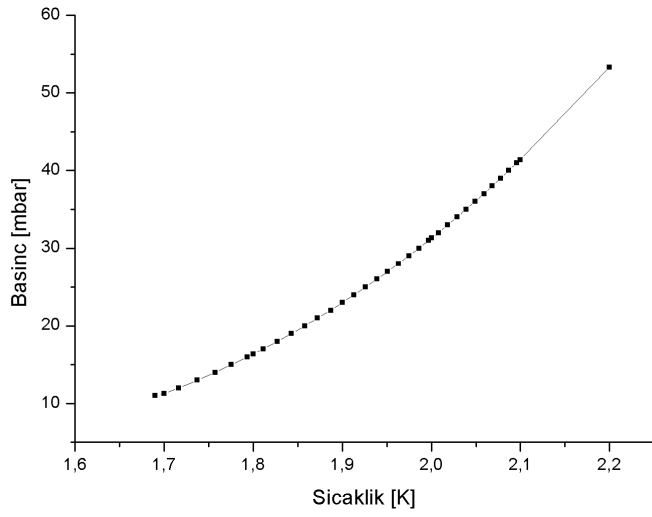
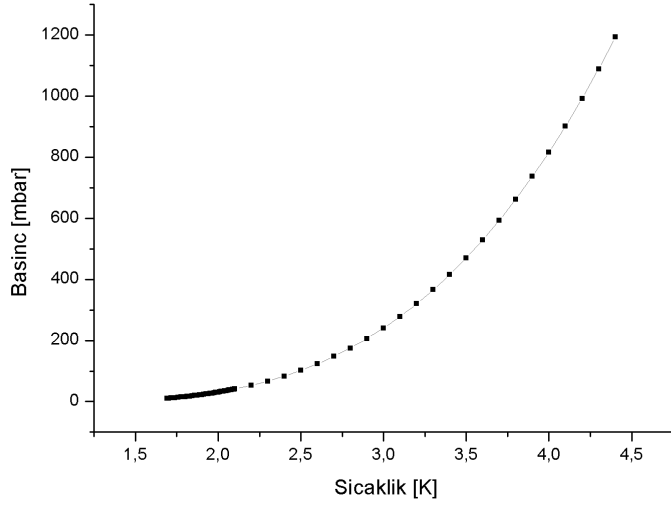
3.4.5 Sıvı helyum dağıtım sistemi

Bu sistem, dağıtım kutusu, transfer hatları, valf kutusundan oluşur. Sistem, sıvılaştırıcı sistemden başlar, süperiletken RF kavitelere kadar uzanır. Dağıtım kutusu sıvı helyumun, soğutulmak istenen kısımlara gönderildiği yerdir.



Şekil 3.15 Dağıtım kutusu ve transfer hatlarının görünümü

Dağıtım kutusuna aynı zamanda valve box'ta denir. Dağıtım kutusunun içinde, soğutucu kutudan 4 K'de çıkmış olan sıvı helyum basınç azalmasıyla 1.8 K'e düşürülür. Bunun için Joule-Thomson vanasının ardından vakum pompası konur. Bu vakum pompası yardımıyla kutu içindeki basınç 16 mbar'a düşürülür ve bu şekilde helyum sıvısının daha da soğuması sağlanır. Grafiklerde sıvı helyumun, sıcaklığa karşı gelen basınç değerleri görülmektedir. Bu grafik yardımıyla da 1.8 K değerinin yaklaşık olarak 16 mbar'a denk geldiğini görebiliriz.



Şekil 3.16 Sıvı helyum basınç sıcaklık eğrisi

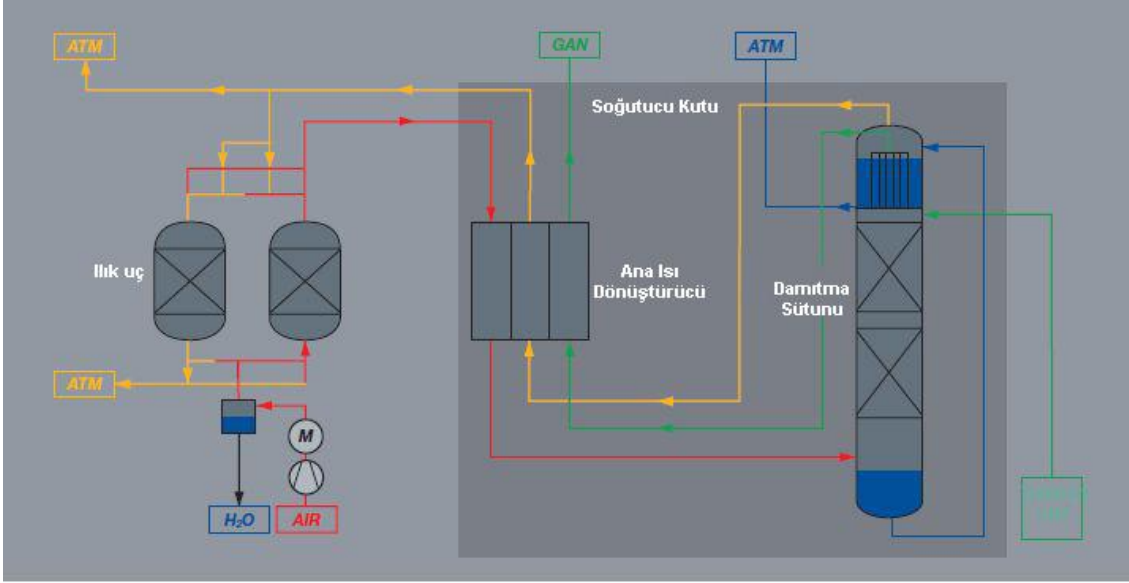
Şekil 3.16'da sıvı helyum için basınç-sıcaklık grafiği görülmektedir. Bu grafiğe bakıldığında da helyumun 1 barlık basınç değerinde sıvılaştığı ve 16 mbar da ise 1.8 K değerinde sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir.

3.4.6 Transfer hatları

Transfer hatları soğutucu sistemdeki elemanları birbirine bağlayan ve sıvı helyumu soğutulmak istenen modüle taşıyan hatlardır. Transfer hatları tasarlanırken basınç düşüşlerini ve ısı sızıntılarını engellemeye yönelik çalışmalar yapılır. Transfer hatlarında vakum yalıtımları ve çok katmanlı yalıtımlar kullanılmaktadır. Helyum transfer hatlarında paslanmaz çelik kullanılır. Paslanmaz çeliğin tercih edilme sebebi yüksek sünekliğe sahip olması, çok düşük sıcaklıklara dayanıklı olması ve ısıl iletkenliğinin düşük olmasıdır. Transfer hatlarında helyum taşınması için süper yalıtım (superinsolation) olarak adlandırılan bir teknoloji kullanılır. Bu teknoloji birçok katmanın çok küçük aralıklarla bir araya gelmesinden oluşur. Ayrıca çok düşük sıcaklıklarda helyum taşınacağı ve helyumun buharlaşma ısısı çok düşük olduğu için sıvı azotla ya da yine düşük sıcaklıktaki helyum ile yalıtım yapılır.

3.5 Sıvı Azot Soğutma

Sıvı azot, helyum soğutma sistemlerinde ön soğutucu akışkan olarak kullanılmaktadır ve sistemin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Sistemde bulunan soğutucu kutu ve transfer hatlarında kullanılmaktadır. Sıvı azot satın alınabildiği gibi havadan kolaylıkla da üretilebilir. Azot gazı havada %78 oranında bulunan bir gazdır. Bu sayede azot soğutma için gerekli N_2 miktarı havadan sağlanabilir. Sıvı azot, hava sıvılaştırma tesislerinde üretilir. Bu işlem ilk önce alınan havanın temizlenmesiyle başlar. Kirlilikten ve sudan arınan hava ön soğutulur. Ardından büyük pompalarla yaklaşık olarak 100 atm'ye sıkıştırılır, sıkışan gaz soğur. Genleşme türbinlerinden geçer ve ısı dönüştürücülerden faydalanılır. Böylece oksijen ve azottan oluşan hava iyice soğutulmuş olur. Damıtma işlemi yardımıyla azot havadan ayrılır. Bu şekilde azot sıvı halde elde edilebilir. Şekil 3.17'de örnek bir azot sıvılaştırma sistemi görülmektedir.



Şekil 3.17 Azot sıvılaştırma işlemi için diyagram

Şekil 3.17’de ılık ucunda kompresör ve moleküler elek istasyonu vardır. Burada hava iki adet moleküler soğurucuya girmeden önce tozlardan ve mekaniksel kirliliklerden arındırılarak, gerekli olan basınca sıkıştırılır. Soğurucuda ise su, karbon dioksit vb. safsızlıklardan arındırılır. Daha sonra soğutma ve sıvılaştırma işlemi soğuk uça gerçekleştirilir. Burada yer alan ısı dönüştürücülerden hava geçer sıvılaşır. Ardından damıtma işlemi gerçekleştirilir.

Sıvı azotun sistemde kullanılmasının yararları yanında zararları da vardır. Sıvı azot soğutucu ve sıvılaştırıcı sistemlerin maliyetini düşürür, daha küçük bir soğutucu kutu ve böylece daha küçük bir kompresör seçimi sağlayabilir. Bunun yanında elektrik ihtiyacını artırır ve sürekli bir azot ihtiyacı gerektirir. Bu da yaşanan yerde ki elektrik ve azot fiyatlarına bağlı olarak, çalışma maliyetini arttırabilir. Soğutucuya herhangi bir bakım yapılırken, mesela türbinler yerleştirilirken soğutucunun 80 K’ de kalmasını sağlayabilir. Diğer taraftan zararlarına bakacak olursak; sistemde başka bir akışkanın varlığı basınç düşüşlerine sebep olabilir ve bu da kapasite kaybına neden olabilir. Ayrıca, sisteme düzenli olarak azot takviyesi yapmak ve azotun tesise getirilmesini garantilemek gerekmektedir. Bu durum çevre koşullarına bağlılığı da beraberinde getirir.

3.6 Soğutma Sisteminin Belirlenmesi ve Performansı

Soğutucu sistemi belirlemede bakılması gereken temel nokta, sistemin ısı yüküdür. Başka bir deyişle, transfer hatlarında veya soğutulması istenen modüldeki soğukluk ihtiyacıdır. Hızlandırıcı sistemlerde ısı yükü statik ve dinamik olarak iki şekilde oluşur. Statik ısı yükü ışınlam ve iletimden kaynaklanır. Yayınlam da statik ısı yüküne katkı yapmaktadır fakat çok küçük bir değer olduğu için hesaplanmayıp, ihmal edilmektedir. Ayrıca bu etki vakumla ortamda gözlenmemektedir. Dinamik ısı yükü ise kavitelerden ortaya çıkan bir değerdir. Bu iki değer toplanarak sistemin ısı yükü bulunur ve soğutucu sistemin tasarımı bu noktadan sonra başlar. Kaviteler için dinamik ısı yükü Eşitlik 17 ile bulunur.

$$P_{\text{kayıp}} = \frac{V_{\text{hızlandırıcı}}^2}{Q_0 \left(\frac{R}{Q} \right)} \quad (3.8)$$

Bu hesabın yapılması zordur. Çünkü kaviteler için tüm etkileri bilinmesi oldukça güçtür, bunun için tahmini hesaplar yapılabilmektedir. Her bir kavite için gradyan fonksiyonu olarak ısı kaybını ölçmek gerekmektedir ya da daha önce yapılmış olan ölçümlerden yararlanılarak değer bulunabilmektedir.

Isı yükünün belirlenmesinin ardından gerekli olan soğutucu kutu seçilir. Dünya üzerinde iki adet firma bu ölçüde büyük ihtiyaçları karşılamak için gerekli cihazları üretirler. Bu şirketler Linde (İsviçre) ve AirLiquid (Fransa) şirketleridir. Bu iki firmanın soğutucu performansları Çizelge 3.3'te görülmektedir.

Çizelge 3.3 Linde ve Airliquid firmalarının soğutucu ve sıvılaştırıcı performansları

	Firma	Model	Sıvı Azot Ön-Soğutmalı	Sıvı Azot Ön-Soğutmasız
Sıvılaştırıcılar	Linde	L70	40 – 70 l/h	20 – 35 l/h
		L140	90 – 140 l/h	45 – 70 l/h
		L280	200 – 290 l/h	100 – 145 l/h
	AirLiquid	HELIAL SL	30 – 50 l/h	15 – 25 l/h
		HELIAL ML	75 – 150 l/h	35 – 70 l/h
		HELIAL LL	215 – 330 l/h	110 – 145 l/h
Soğutucular	Linde	LR70	130 – 190 W	100 – 145 W
		LR140	255 – 400 W	210 – 290 W
		LR280	560 – 900 W	445 – 640 W
	AirLiquid	HELIAL SF/MF/LF	100 – 1000 W	

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, helyum soğutma sistemlerini ele alan kitaplar ve makaleler incelenmiştir. Ayrıca dünyadaki hızlandırıcı sistemlerin siteleri incelenmiş, nasıl bir soğutma sistemleri kullandıkları araştırılmıştır. İncelenen kitap, makale ve siteler sonucunda elde edilen verilerden soğutma sistemlerinin temelleri, fiziği, alt sistemleri öğrenilmiş ve bunlar temel alınarak Autocad 2007 ve Origin 8.1 programı ile bina planı baz alınarak gerekli çizimler yapılmıştır.

THM IR-SEL tesisi için soğutma sistemi ihtiyacı belirlenmesinde, benzer sisteme sahip olan laboratuarlara bilimsel ziyaretlerde bulunulmuştur. Tesiste kullanılması düşünülen süperiletken kaviteler ELBE (Dresden, Almanya) ve ALICE (Daresbury, İngiltere) kaviteleri ile aynı olup, bu tesislerin verilerinden faydalanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca bu iki laboratuvarın soğutma sistemleri, o ülkelere gidilerek yerinde incelenmiştir. Buna göre, soğutma sisteminin belirlenmesinde temel olan statik ve dinamik ısı kaybı belirlenmiştir.

Helyum soğutma sistemini konu alan makaleler dışında ayrıca proje donanım komitesi üyeleri Doç. Dr. Suat Özkorucuklu ve Araş. Gör. Avni Aksoy'un 2009 ve 2010'da Linde ve AirLiquid şirketleriyle yerinde yaptıkları görüşmelerden ve buradan sağlanan dokümanlardan yararlanılmıştır. Ayrıca, Linde ve AirLiquid firmalarının üniversitemize yaptıkları ziyaretlerden elde edilen bilgiler ve tartışmalarda baz alınmıştır.

5. THM IR-SEL TESİSİ İÇİN HELYUM SOĞUTMA SİSTEMİ

5.1 Giriş

Fizibilite raporu 2001’de, İçerik Tasarımı raporu 2005’te tamamlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi, 2006 yılından itibaren DPT desteği ile Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) formatında ve 10 üniversitenin işbirliği ile yürütülmektedir (<http://thm.ankara.edu.tr>). Projenin 3. Aşaması olan DPT-YUUP projesi (DPT2006K-120470) döneminde tanımlanmış iki ana amaçtan birisi ülkemizde hızlandırıcıya dayalı Ar-Ge altyapı oluşumunu başlatmak amacıyla ilk hızlandırıcı tesisini kurmak, diğeri ise Türk Hızlandırıcı Merkezi’nin (THM) Teknik Tasarımını tamamlayarak, projelendirip DPT’ye sunmaktır.

THM’nin ilk tesisi olarak Ankara Üniversitesi Gölbaşı kampus alanında inşası devam eden Infrared (kızılötesi) Serbest Elektron Lazeri (IR SEL) tesisi temelde 10-40 MeV süperiletken elektron hızlandırıcısına dayalı olarak 2-250 mikron dalgaboyu aralığında SEL etmeyi amaçlamaktadır. Tesiste SEL’in kullanımı için bir lazer diyagnostik odası ve 7 deney istasyonu planlanmıştır (Aksoy A, Karşlı Ö and Yavaş Ö., 2007). Üretilen SEL demetleri ile bu 7 istasyonda biyoteknoloji, malzeme bilimi, yarı iletken teknolojisi, medikal uygulamalar, foto kimya, foto biyoloji, ziraat, çevre, savunma vb alanlarda Ar-Ge çalışmaları mümkün olacaktır. Tesiste ayrıca elektron demetinin ikincil bir amaç için kullanımını sağlayacak Bremsstrahlung (frenleme ışınımı) hattı ve deney istasyonu da yer almaktadır(Aksoy A., 2010).

Proje kapsamında önerilerek Şubat 2010’da onaylanarak resmen kurulumu tamamlanan Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü hizmet binası da tesisle aynı alanda inşa edilmiştir.

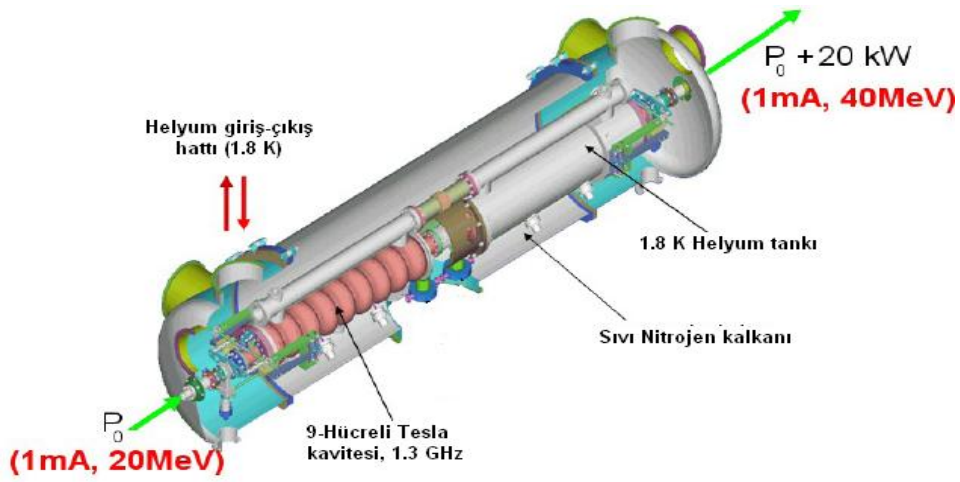
THM IR SEL tesisinde kurulumu gerçekleştirilecek elektron hızlandırıcısı toplam iki modülde (ELBE modülü) 4 adet 1.3 GHz RF frekansıyla çalışan ve Niobium’dan yapılan süperiletken RF kavitelemeler içerecektir. Bu bölümde tezin asıl amacını oluşturan ve THM IR SEL tesisinin tesisinin en pahalı ve en hassas alt sistemi olarak ortaya çıkan He soğutma sisteminin tanımı yapılmış, tasarımı ve kurulumu tanımlanmış ve benzer iki

laboratuar olan ELBE (Dresden, Almanya) ve ALICE (Daresbury, İngiltere) laboratuarları ile He soğutma sistemi karşılaştırılmıştır.

5.2 Örnek Helyum Soğutma Sistemleri

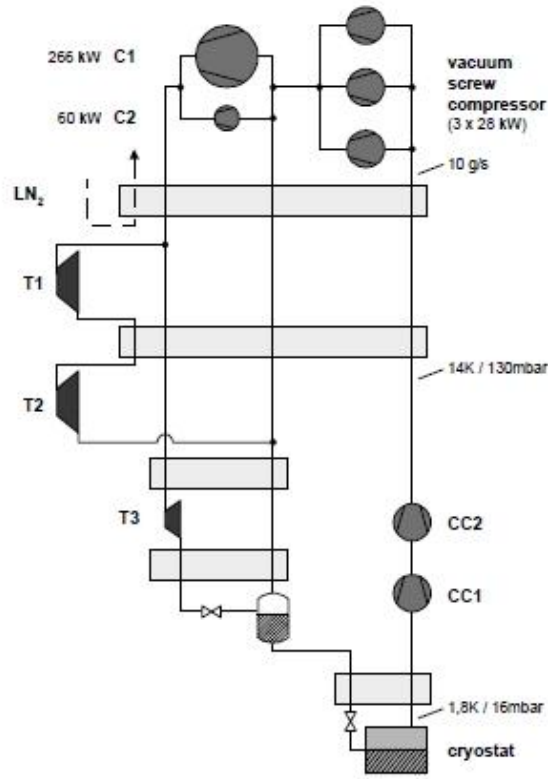
5.2.1 ELBE laboratuvarı (Dresden, Almanya)

Rosendorf Araştırma Merkez'indeki ELBE laboratuvarında dört adet kavite bulunmaktadır. Bu kaviteler de hızlandırma gradyeni 10 MV/m ve demet akımı 1 A'dir.



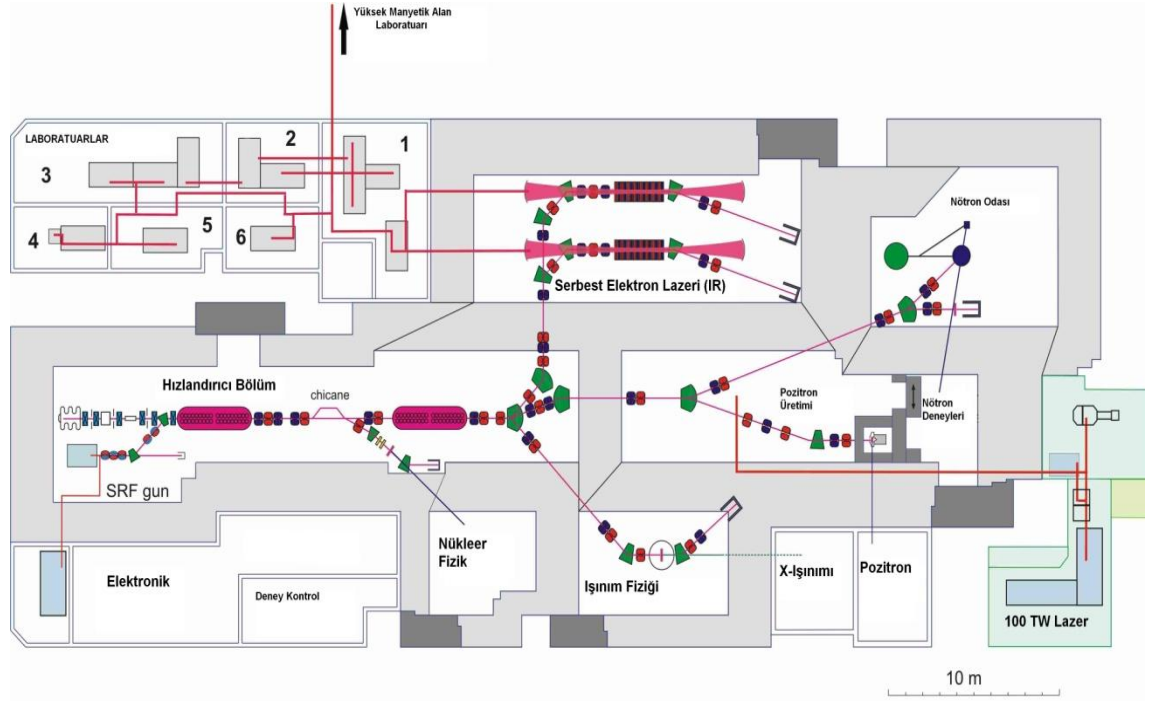
Şekil 5.1 9-hücreli Tesla kavitesinin şekli

Şekil 5.1'de ELBE laboratuvarında kullanılan 9-hücreli Tesla kavitesinde sıvı helyum giriş çıkış kısmı, sıvı azot ve sıvı helyum tankları görülmektedir.



Şekil 5.2 ELBE soğutma sistemi (<http://www.hzdr.de>)

Şekil 5.2’de kompresörlerden gelen gaz soğutucu kutuya gelir. Şekilde görülen T1, T2 ve T3 genişleme türbinlerini ifade ederken dikdörtgen şekiller ise ısı dönüştürücüleridir. Bunlardan geçen gaz sıvılaşır ve en son olarak helyum saklama kabına (cryostat) gelir. Buradan soğutulmak istenen bölgeye sıvı helyum taşınır.



Şekil 5.3 ELBE Laboratuvarının yerleşim planı (<http://www.hzdr.de>)

Şekil 5.3'te ELBE laboratuvarının yerleşim planı görülmektedir. Burada bulunan deney odalarının ilki dioagnostik odasıdır ve IR görüntüleme, biyolojik IR deneyleri yapılmaktadır. İkinci deney odasında femtosaniye lazer, THz spektroskopisi ve IR pump-probe deney üniteleri bulunmaktadır. Üçüncü deney odası time-resolved yarıiletken spektroskopisi ve THz spektroskopisi için kullanılmaktadır. Dördüncü deney odası fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR) ve biyolojik IR deneyleri yapılmaktadır. Son iki deney odasında sırasıyla near-field ve pump-probe IR deneyleri ve ışın kimyası, frekans üretimi deneyleri yapılmaktadır.

ELBE Işınım Kaynağı için helyum tesisinde, Claude çevrimi temel alınmıştır ve soğutma kapasitesi 1.8 K'de 220 W iken 80 K'de 200 W olarak belirlenmiştir. Soğutma tesisinde temel amaç süperiletken kavite için ihtiyaç duyduğu 1.8 K sıcaklığını sağlamaktır.



Şekil 5.4 ELBE Işınım Tesisinde kullanılan soğutucu kutu ve transfer hattı

1.3 MPa ve çevre sıcaklığında sıkıştırılmış helyum gazı, 4.4 K'e soğutulur. Bunun için, soğutucu kutuda başlangıç olarak ısı dönüştürücülerden geçer. Soğuk helyumun küçük bir kısmı kollara ayrılır ve başka bir ısı dönüştürücüyü geçtikten sonra, doğrudan kavite kryostatlarına yerleşir, 1.6 kPa'a genişletilir (1.8 K'e karşı gelen helyum buhar basıncı).

Atmosferik basınca sıkıştırma kısmen, iki aşamalı "Soğuk sıkıştırma" ile yapılır, örneğin, helyum gazı, arka arkaya iki santrifüj makine yoluyla düşük sıcaklıklarda (yaklaşık olarak 4.4 K) kısmen sıkıştırılır. Soğuk kompresörler, birçok ileri tekniğe gereksinim duyar ve bu yüzden şimdiye kadar sadece, örneğin CERN gibi büyük ölçekli helyum tesislerinde kullanılmıştır. Soğutucu kompresörün faydalarından biri, çevre sıcaklığında vakum sistemi ve soğuk kutunun içinde düşük yoğunluklu sıcaklık dönüştürücüleri için boyut ve masraflarda maliyeti azaltmasıdır. Ayrıca soğuk kompresörler, sıkıştırılan helyumun basıncının dengede tutulmasını sağlar. Diğer bir

görevi ise, helyumun sıcaklığını düşürmek için basıncını düşürmek gerektirmektedir ve bunu sağlar. 30 mbar ve üzerindeki basınç değerlerinde helyum sıcaklığı 2.5 K'e düşürülebilmektedir. Gereken soğukluğa ulaşmak için ise 1 mbar gerekmektedir. Bu yüzden daha büyük bir pompalama sistemine ihtiyaç vardır ve soğuk kompresörler ile bu sağlanabilmektedir. Süperiletken kaviterler mekaniksel titreşimlere (mikrofonik) aşırı duyarlıklı oldukları için, tüm bileşenler ayrı ayrı inşa edilerek, yerleştirilirler. Helyum çevrim kompresörü, KAESER firmasına ait olan dönel vidalı kompresörler ve dönel vidalı vakum kompresörlerinden oluşmaktadır. Bu kompresörler 226 kW (FSD440-iki adet) ve 60 kW(CSV150-3 adet) güçlere sahiptirler.



Şekil 5.5 ELBE Laboratuvarında kullanılan kompresörler

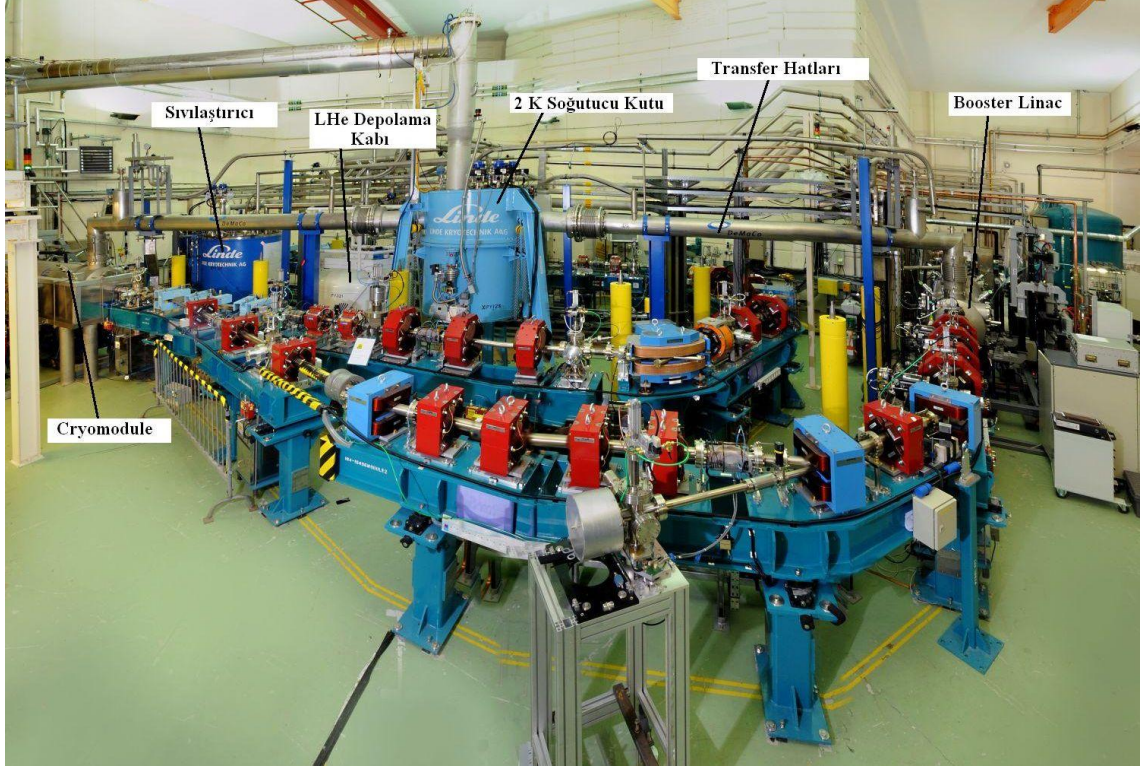
Hızlandırıcı tesiste SIEMENS'e ait olan WinCC (Windows Control Center) programı kullanılmaktadır. Tesiste her bir alt birimin kontrol sistemi genel olarak bağımsız çalışır ve bu birimler bir alt süreçle birbirlerine bağlanmaktadır. Bunu gerçekleştirebilmek için SIEMENS'in programlanabilir mantık kontrol birimleri (PLC), genellikle Simatic S7 ile dağıtılmış bir sistem olarak kullanılmaktadır. Helyum soğutma tesisinin kontrolü için S7-400 kullanılmaktadır. Kontrol sistemi bilgisayar ekranından takip

edilebilmektedir. Helyum soğutma tesisinde WinCC programı doğrusal hızlandırıcılar, soğutucu kutu, kompresörler, soğuk kompresör, saflaştırıcı ve dağıtım kutusundan alınan basınç, sıcaklık, sıvı seviyesi gibi verileri ekrana yansıtır.

ELBE tesisinde helyum soğutma sisteminde başlangıçta bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Karşılaşılan problemler, kirlilik, vakum kompresörlerinde ve genleşme türbinlerinin çalışmasında aksamalar olması gibi problemlerdir.

5.2.2 ALICE laboratuvarı (Daresbury, İngiltere)

ALICE (Accelerators and Lasers in Combined Experiments) tesisinde ACCEL firması tarafından üretilen her biri iki adet süperiletken RF kavite içeren iki adet soğuk modül bulunmaktadır. Soğutma sistemi, 2 K'de çalışan bu iki adet süperiletken kaviteyi soğutması için tasarlanmıştır. Bu kavitelere biri booster olarak kullanılmaktadır ve bu hızlandırıcıda demet enerjisi 35 MeV'dir. 2 K sıcaklıkta 118 W'lık dinamik ısı yükü kapasitesi ile çalışabilir. Sistem, helyum kompresörü, sıvılaştırıcı (4 K), sıvı helyum depolama kabı, 2 K soğutucu kutusu, 2 K ısı dönüştürücüsü ve iki tane çevre sıcaklığında çalışan vakum pompalama sistemine sahiptir.



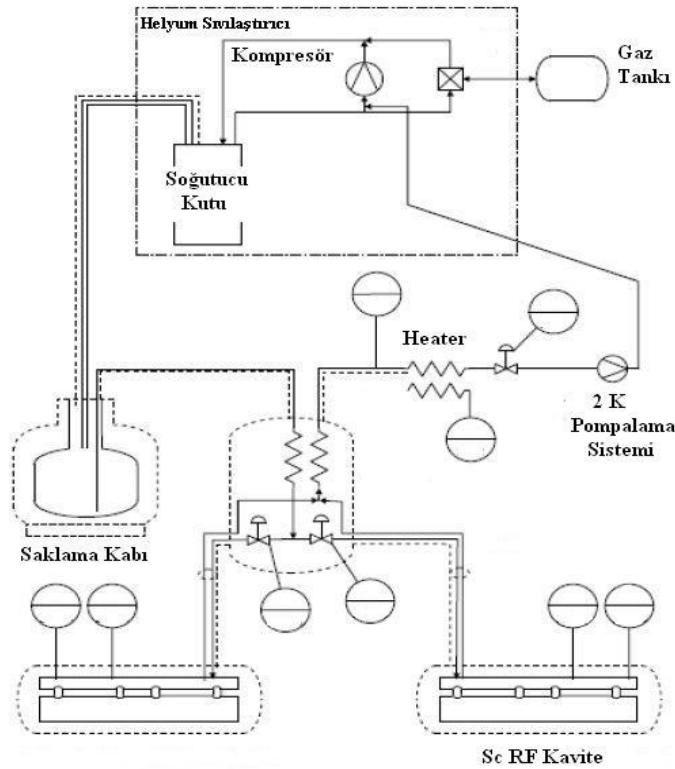
Şekil 5.6 ALICE hızlandırıcı sistemi (<http://alice.stfc.ac.uk/>)

Sistemde soğutucu kutu olarak Linde firmasına ait olan TCF50 modeli tercih edilmiştir. Kompresör ise KAESER firmasına ait olan ESD441 tipi vidalı kompresördür. Hızlandırıcının soğutma sisteminde soğutucu kompresörler yerine vakum pompaları kullanılmıştır. ELBE’de ise soğutucu kompresörler kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan vakum pompaları 2 K sıcaklığa düşülebilmesi için kullanılan 2 K soğutucu kutusunu desteklemektedirler.

Sistem, sıvı depolama kabında tutulan sıvı helyum stoku üretmek için 4 K’lik soğutucu kutu kullanarak çalışmaktadır. Daha sonra kaviterler, 300 K ve 150 K arasında 30 K/saat’lik soğutma oranı sağlamak için 4 K soğutucu kutusunun içindeki farklı kaynaklardan ılık ve soğuk gaz karışımının kontrolünü sağlayarak soğutma işlemini gerçekleştirir. 150 K ve 90 K arasındaki sıcaklıklarda soğutma oranı 180 K/saat’e yükselir. Bu büyük soğutma oranı korunur, böylece RF kaviterlerin de verimlilik kaybı olmaz. ALICE bunu sıvının kaviterler içine doğrudan enjekte edilmesi yoluyla başarır. Soğutma işleminin bu kısmı süresince, kavite sıcaklığı 175 K’e ulaşır ulaşmaz sıvı

besleme vanaları açılmaktadır. Kaviterler sıvı ile doldurulduğu zaman, helyum gazı vakum pompalama sistemleri tarafından yukarıya pompalanır. Vakum pompaları, 2 K sıcaklığında çalışmak için gerekli olan kaviterlerdeki vakum basıncını yaklaşık 110 mbar'dan 30 mbar'a düşürür. Kaviterlerden dönen soğuk gaz, vakum pompalarına ulaşmadan önce 15 kW'lık heater ile ısıtılır.

Kaviterlerdeki basınç, kaviterlerden dönüş kanallarında ilk noktada kontrol edilmektedir. Gereken 1.3 GHz deki frekans değerinde basınç kararlılığını sağlamak için kontrol altında tutulması gerekmektedir. Sistemin tasarım parametresi belirlenen basınç kararlılığının, ± 0.1 mbar da olması istenmektedir ve sistem çalışma durumunda, ± 0.03 mbar değerinde basınç kararlılığı sağlamaktadır.



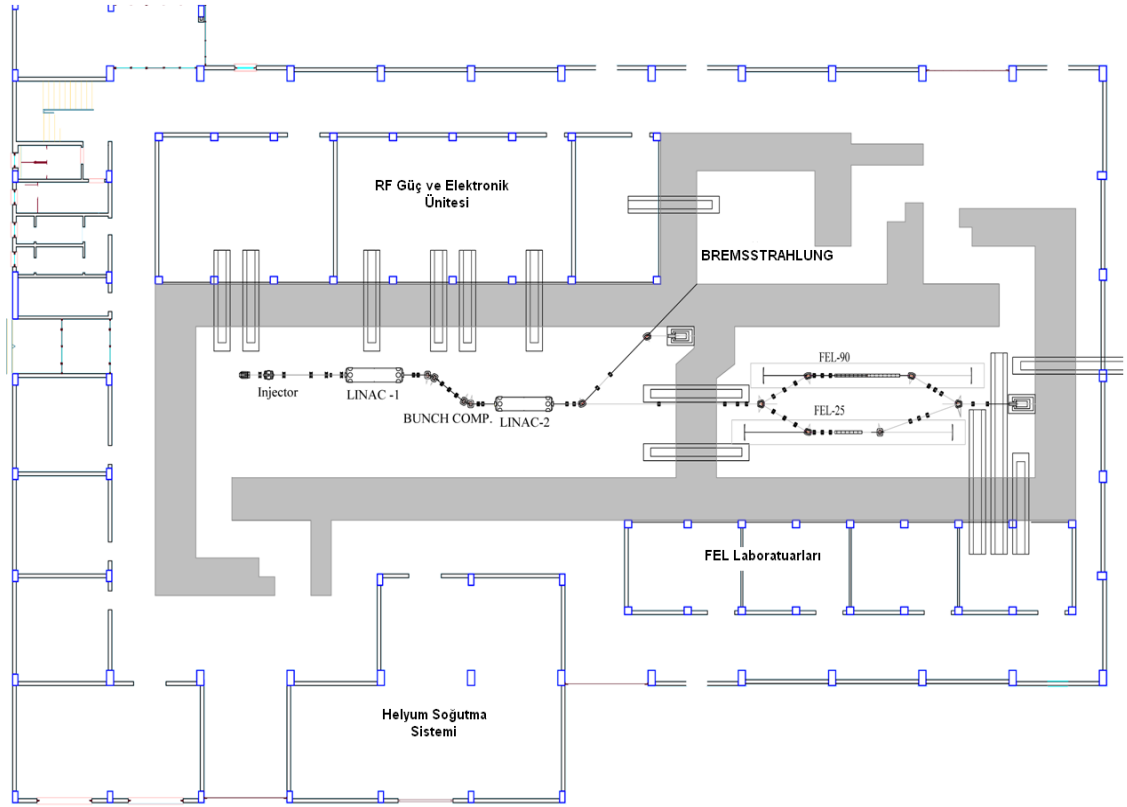
Şekil 5.7 Soğutma sisteminin şematik görünümü (<http://alice.stfc.ac.uk/>)

Bu tesiste, TCF50 soğutucu tesislerinde kullanılan Linde firmasının standart kontrol yazılımı olan SIEMENS SIMATIC S7-400 kontrol sistemi kullanılmaktadır. Bu yazılım

ile bileşenlerin dijital ve analog verileri ile çalışma durumları izlenir. Ayrıca acil durumlar ve sistemde çıkan hatalar görüntülenir. Kompresör, soğutucu kutu ve türbinlerin çalışmaları başlatılır ve bitirilebilir. Vakum pompaları ayrı bir kontrol sistemi ile takip edilir. Pompalar için kullanılan program ise, Siemens SPS Type SIMATIC C7 yazılımıdır.

5.2.3 THM IR-SEL tesisi için soğutma sistemi ve kurulum planı

Ankara Üniversitesi Gölbaşı kampüs alanında inşası devam eden THM IR-SEL tesisinin laboratuvar kısmının yerleşim planı Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 THM IR-SEL Laboratuvarı zemin kat yerleşim planı

THM IR-SEL tesisinde helyum soğutma sistemine ihtiyaç duyan cihazlar süperiletken kavitelere sahiptir. Tesiste dört adet kavite kullanılması düşünülmektedir. Kavite ikili gruplar halinde soğuk modüle yerleştirilmektedir. Bu süperiletken kavite için

soğutma ihtiyacı, kavite başına 45 W olmaktadır yani bir soğuk modül için gerekli olan soğutma ihtiyacı 90 W'tır. Bu ısı yükleri dinamik ısı yükü olup ayrıca 15 W değerinde statik ısı yükü vardır. Bu yüzden bir soğuk modülün toplam ısı yükü 105 W olmaktadır.

Soğutma ihtiyacını karşılamak için seçilebilecek olan seçenekler ya sıvılaştırıcı ya da soğutucudur. Toplam ısı yükü soğuk modüller ve transfer hatları;

$$(105 \times 2) + (0.2 \times 20) \cong 215 \text{ W} \quad (5.1)$$

Sıvılaştırıcı kullanmak istersek, sıvılaştırıcının sağlaması gereken performans

$$1.4 \left(\frac{1}{h} \cdot \frac{1}{W} \right) \times 215 \text{ W} \cong 300 \text{ l/h} \quad (5.2)$$

olmaktadır. Burada yapılan hesaplama, 1 W'lık ısı yükünün için 1.4 l/s miktarında helyum gerektiği dikkate alınmıştır.

$$215 \times 1.5 \cong 323 \text{ W} \quad (5.3)$$

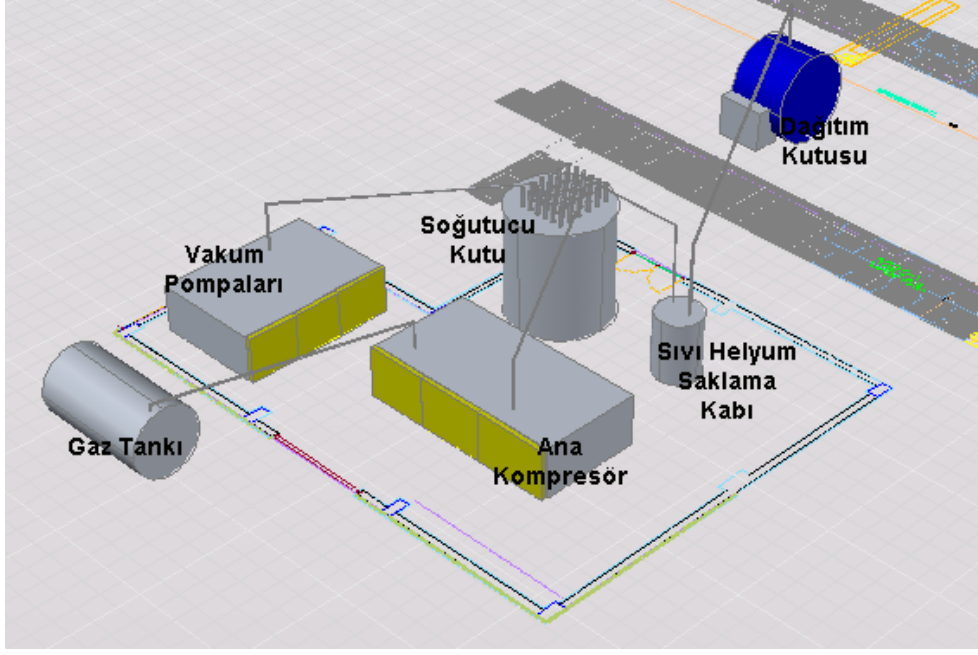
olmaktadır.

Sıvılaştırıcı ve soğutucu seçiminde önemli payı olan bir diğer etken ise, ılık vakum kompresörleri mi yoksa soğuk kompresör mü seçileceğidir. Bu seçim kurulum maliyeti ve çalıştırma maliyeti dikkate alınarak yapılmaktadır. Dikkate alınması gereken bir diğer etken ise soğutucuların verimliliğinin daha iyi olmasıdır.

Çizelge 3.3'te iki firma için soğutucu ve sıvılaştırıcıların performansları görülmektedir. Linde firmasına ait olan LR280 (sıvı azot ön-soğutmasız) ya da LR140 (sıvı azot ön soğutmalı) modelleri seçilebilir. Sıvı azot ön soğutma kullanımı tamamen kullanıcıya ait olan bir seçimdir. Sıvı azot ön soğutma kullanmanın çeşitli faydaları ve zararları vardır. THM IR-SEL tesisi için düşünülen soğutma sisteminde ön soğutma

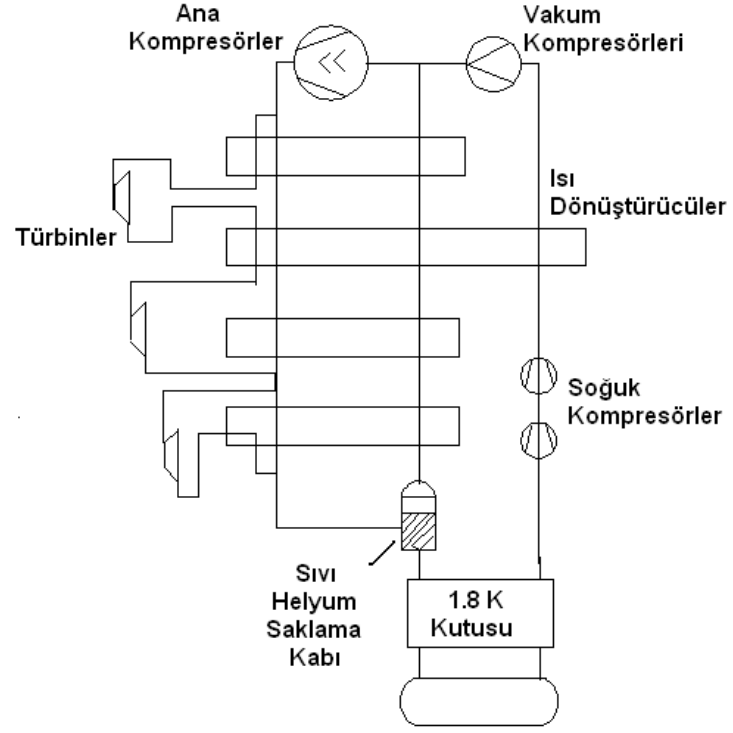
düşünülmemektedir. Bu durumda soğutucu kutu olarak, LR280 modeli kullanılabilir. Soğutucu kutu belirlendikten sonra yapılması gereken iş uygun olan kompresörü seçmektir. Gerekenden daha yüksek çalışma kapasiteli kompresör seçimi, herhangi bir aksaklık için yararlı olacaktır. Soğutucu temelli soğutma sistemi seçileceği için kullanılması gereken cihaz soğuk kompresörlerdir. Soğuk kompresörün getirdiği eksilerden biri, sistemdeki ısı yükü azaldığı zaman sistemin performansının düşmesini istersek, bunun gerçekleştirilmesini zorlaştırmasıdır. Kompresör modeli olarak ise, KAESER firmasının yüksek güce sahip olan kompresörlerinin kullanılması planlanmıştır. THM IR-SEL tesisi için KAESER firmasına ait olan FSD571 tipli dönel vidalı kompresörü kullanılabilir. Bu kompresörün sahip olduğu özelliklere bakacak olursak, kompresör 315 kW'lık motor gücüne sahiptir ve 3010x2177x2360 mm boyutlarındadır. Sıvı helyum saklama kabı ise 2000 l kapasiteye sahiptir. Sistemde yer alan dağıtım kutusu, 1.8 K kutusunu içermektedir ve soğutucu kutudan 4 K sıcaklığında çıkan helyum 1.8 K'e burada düşürülmektedir.

Şekil 5.9'de tesis için düşünülen soğutma sisteminin ana elemanlarının yerleşimi görülmektedir. Dağıtım kutusu hızlandırıcı sistemin olduğu alanda yer alacaktır. Bunun sebebi, bu kutu içinde yer alan 1.8 K kutusundan çıkan helyumun sıcaklık değerini transfer hatlarında kaybetmemek içindir, mümkün olduğunca kısa bir transfer hattı kullanmaya yönelik olarak gerçekleştirilen bir durumdur. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi 1.8 K dağıtım kutusundan gaz çıkar ve geri dönen gaz iki aşamalı soğuk kompresörden geçer. Burada sıkıştırılan gaz vakum pompalarına gelir ve burada 1.05 bar'lık basınç değerine geri döner. Ayrıca ana kompresör ve soğutucu kutunu iç yapısı da görülmektedir. Soğuk kompresörler soğutucu kutu içine yerleştirilmektedir. Soğutucu kutudan 4 K sıcaklığında çıkan helyum, sıvı helyum saklama kabına alınır ve oradan dağıtım kutusuna gönderilir.



Şekil 5.9 Helyum soğutma sisteminin şematik görünümü

Linde modeli standart bir kontrol yazılımına sahip olup, SIEMENS S7 serisi ile soğutma sisteminin kontrolünü sağlamaktadır. Alt sistemlerden gelen veriler kontrol ekranına yansıtılarak, ayrı ayrı gözlemlenebilmektedir. Herhangi bir sorunla karşılaşıldığında, bu sorun kontrol ekranına yansımaktadır. Kompresörlerin kontrol yazılımı ise, kompresör üzerine yerleştirilen SIGMA-CONTROL ile sağlanmaktadır. Bu bir çeşit endüstriyel bilgisayardır ve dokunmatik tuşlarla kompresör üzerinde ayarlamalar yapılabildiği gibi ayrıca sorun çıktığında kompresörün kendisini kapatmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.10 THM IR-SEL tesisi için planlanan helyum soğutma sisteminin diyagramı

6. SONUÇ

Süperiletken RF kavite kullanımı parçacık hızlandırıcılarının ihtiyaç duydukları soğukluğu elde etmek için helyum soğutma sistemi kullanılmaktadır. Bunun sebebi, helyumun çok düşük bir kaynama sıcaklığına sahip olması ve kimyasal tepkimeye girmemesidir. Helyum soğutma sistemi pek çok alt sistemin birleşimi olup, kompleks bir yapıya sahiptir. Bu sebeple soğutucu sistem oluşturulurken her bir alt sisteme dikkat edilmeli ve birbirleri ile uyumlarına bakılmalıdır. Buna bağlı olarak Gölbaşı'nda kurulan THM IR-SEL tesisi için gerekli olan soğutucu güç belirlenmiş ve bu gücü sağlayacak sistemin bileşenleri tanıtılmıştır. Küçük ve büyük ölçekli süperiletken hızlandırıcı sistemlerde helyum soğutma sistemi kullanılmakta ve teknolojisi gelişmeye devam etmektedir.

Helyum soğutucu sistemlerin temel elemanları soğutucu kutu, kompresör, yağ arındırma sistemi, sıvı helyum saklama kabı, dağıtım kutusudur. Alt sistemler seçilirken başlangıç olarak ısı yükünün belirlenmesi ve bu ısı yükünü karşılayabilecek olan soğutucu kutunun seçimi ile başlar. Daha sonrada kompresör seçimi belirlenir. 1.8 K kutusu ya da 2 K kutusu ihtiyaç duyulan soğutma gereksinimine bağlı olarak seçilir. Orta ve büyük ölçekli hızlandırıcı sistemlerde kullanılan süperiletken kaviteler bu soğutma derecesine ihtiyaç duydukları için, bu tesislerde kullanılmaktadırlar. ELBE (Dresden, Almanya) ve ALICE (Daresbury, İngiltere) laboratuvarları incelenmiştir. İki laboratuvar aynı süperiletken hızlandırıcı kaviteye sahip olmalarına rağmen soğutma sistemleri farklıdır. ELBE laboratuvarında soğuk kompresör kullanılırken, ALICE'te ise vakum kompresörleri kullanılmaktadır.

Hızlandırıcı sistemler için ısı yükü statik ve dinamik ısı yükü olarak ikiye ayrılır ve bunların toplamı gereken soğutma ihtiyacını temsil eder. Statik ısı yükü ışınlam ve iletimden kaynaklı olarak ortaya çıkar. Yapılan araştırmalar sonucu THM IR-SEL tesisinde kullanılacak olan süperiletken kavitelerin toplam ısı yükü 215 W olarak belirlenmiş ve buna uygun soğutma sistemi tasarımı tezde belirtilmiştir. Çizelge 5.1'de üç tesis için soğutma gücü gereksinimleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1 ELBE, ALICE ve THM IR SEL Laboratuvarları karşılaştırması

	ELBE	ALICE	THM IR-SEL
Elektron demet enerjisi	20 MeV (soğuk modül başına) (2x20 MeV)	8.35 MeV (Booster linak) 35 MeV (Toplam)	20 MeV (soğuk modül başına) (2x20 MeV)
Soğutma ihtiyacı	220 W (1.8 K)	118 W (2 K)	215 W

THM IR-SEL Tesisi için projelendirilen helyum soğutma sistemi detayları ELBE uzmanları ile 31.01-02.02.2011 tarihlerinde Antalya’da yapılacak bir workshopta detaylıca ele alınıp kararlaştırılacaktır (Linde veya AirLiquid modeli) ve sistem teminine yönelik prosedürler Şubat 2011’de başlatılacaktır. Sistemin üretiminin ve montajının yaklaşık 18 aylık bir sürede tamamlanması öngörülmektedir. THM IR-SEL tesisindeki ilk deneyler için 2013 yılı sonunda hazır olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, A. 2010. Beam Transport and FEL Simulations. 2nd International Machine Advisory Committee (IMAC) meeting for TAC IR-FEL. Bodrum, Turkey.
- Aksoy, A. (Eds.) 2010. The Status of TAC IR FEL and Bremsstrahlung Project. In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, Kyoto, Japan, pp TUPE045.
- Aksoy, A., Karlı and Ö., Yavaş, Ö. 2007. The Turkish Accelerator Complex IR-FEL Project. 4th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Source, WIRMS 2007. Awaji-Island, Hyogo, Japan. Published in Infrared Physics & Technology 51 (2008) 378-381.
- Anonymous. 2010. Accelerators and Lasers In Combined Experiments (ALICE), Daresbury Laboratory, 2010. Web Sitesi: <http://alice.stfc.ac.uk/>, Erişim Tarihi: 09.02.2010
- Anonymous. 2010. ELBE Işınım Laboratuvarı, 2010. Web Sitesi : <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=145&pOid=10242>, Erişim Tarihi: 03.02.2010
- Anonymous. 2010. Türk Hızlandırıcı Merkezi, 2010. Web Sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 21.01.2010
- Balshaw, N. H. 1996. Practical Cryogenics: An Introduction to Laboratory Cryogenics. Oxford Instrument, 96, England.
- Bloch, H. P. 2006. A Practical Guide to Compressor Technology. John Wiley and Sons, 574, USA
- Çengel, Y.A. 2002. Heat transfer: A practical approach. McGraw-Hill, 873, New York.
- Dixon, S. 2005. Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery. Elsevier, 390, USA.

- Ganni V. 2009. Design of Optimal Helium Refrigeration and Liquefaction Systems. Cryogenic Society of America Short Course, USA
- Kabukçu, N.Ö. 2010. Specifications of Helium Cryogenic System for TARLA Facility. 2nd International Machine Advisory Committee (IMAC) meeting for TAC IR-FEL, September 2-3, 2010, Bodrum, Turkey.
- Lebrun, Ph.. 2007. President, Commission A1 “Cryophysics and Cryoengineering” of the IIR Accelerator Technology Department, An Introduction to Cryogenics, CERN, Geneva, Switzerland
- Özışık, M.N. 2002. Basic Heat Transfer. McGraw-Hill, New York.
- Özkorucuklu, S. 2010. Status of TARLA. 2nd International Machine Advisory Committee (IMAC) Meeting for TAC IR-FEL. Bodrum, Turkey.
- Özkorucuklu, S. (Eds.) 2010. The Status of Turkish Accelerator Center Project. In the Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference: IPAC'10, Kyoto, Japan,
- Özkorucuklu, S. (Eds.) 2010. The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation at Ankara (TARLA - TDR). Ankara, p121, Turkey.
- Pınarbaşı A. (Eds.) 2008. Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla. İzmir Güven Kitabevi, 946, İzmir.
- Russenschuck, S., Vandoni G. 2004. CERN European Organization For Nuclear Research, CAS CERN Accelerator School, Superconductivity and Cryogenics for Accelerators and Detectors, CERN Geneva, 430.
- Timmerhaus, K. D. 2004. Cryogenic Process Engineering. 24, Colorado.
- Timmerhaus, K. D., Reed, R.P. 2007. Cryogenic Engineering – Fifty Years of Progress. Springer, 379, USA.
- Turner, S. 1995. CERN European Organization For Nuclear Research, CAS CERN Accelerator School, Superconductivity in Particle Accelerator, CERN Geneva, ISBN 92-9083-084-0, Hamburg, 392.

Van Sciver, S.W. 1986. Helium Cryogenics. Springer, 429, New York.

Ventura, G. 2008. The Art of Cryogenics. Elsevier Ltd., 379, London.

White, G. K., Meeson P. 2002. Experimental Techniques in Low Temperature Physics.
Oxford University Press, 280, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nihal Öykü Kabukçu

Doğum Yeri : Dalaman

Doğum Tarihi : 07.01.1985

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İncirli Lisesi, 2002

Lisans : Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü 2008

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2008 Şubat 2011)

Yayınları (SCI ve diğer)

Kabukçu N. Ö. 2010. Specifications of Helium Cryogenic System for TARLA Facility
IV. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK4), 30
Ağustos-1 Eylül, Bodrum, Türkiye
Submitted to the Balkan Physics Letter (BPL), December 2010.

Kabukçu, N.Ö. 2010. Specifications of Helium Cryogenic System for TARLA Facility.
2nd International Machine Advisory Committee (IMAC) meeting for TAC IR-
FEL, September 2-3, 2010, Bodrum, Turkey.