

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



AŞIRI DÜŞÜK SICAKLIĞA SOĞUTMA TEKNİKLERİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAVUZ OLKAY

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. ÖMER ÖZYURT

BOLU, ARALIK - 2021

KABUL VE ONAY SAYFASI

Yavuz OLKAY tarafından hazırlanan “**AŞIRI DÜŞÜK SICAKLIĞA SOĞUTMA TEKNİKLERİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 15/12/2021

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ömer ÖZYURT
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Kadir BAKIRCI
Atatürk Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Kadir GELİŞ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 29/11/2021 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 17 olarak tespit edilmiştir.

.....
YAVUZ OLKAY

ÖZET

**AŞIRI DÜŞÜK SICAKLIĞA SOĞUTMA TEKNİKLERİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAVUZ OLKAY
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖMER ÖZYURT)**

BOLU, ARALIK - 2021

XVI + 89

Kriyojenik soğutma, yaşanan teknolojik gelişmelerle birlikte, her geçen gün gelişen ve önemi artan bir fizik bilimi araştırma alanıdır. Gelişim süreci, oksijen, nitrojen, helyum gibi gazların sıvılaştırılması ile başlamıştır ve ardından da ilk kriyosoğutucu ortaya çıkmıştır. Sonrasında ise farklı tipte aşırı düşük sıcaklıklara soğutma teknikleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Kriyojenik soğutma teknikleri adından da anlaşılabileceği gibi, aşırı düşük sıcaklıklarda soğutma elde etmek amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Aşırı düşük sıcaklıklar, 120 K sıcaklığının altındaki sıcaklıkları ifade etmektedir. Tez kapsamında değineceğim kriyosoğutucu grubu, dinamik kriyosoğutuculardır ve diğer grup ise %2 kullanım oranına sahip olan statik kriyosoğutuculardır. Dinamik kriyosoğutucular, daha yaygın kullanıma sahip olduğu için ele alacağım gruptur. Dinamik kriyosoğutucular, ısı değiştiricisinin tipine göre reküperatif kriyosoğutucular ve rejeneratif kriyosoğutucular olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Bunun yanında, değineceğim diğer teknikler ise, ultra düşük sıcaklıklarda (1 K altı) soğutma yapmak üzere tasarlanmış ve daha çok deneysel kullanıma sahip olan Kelvin-altı (sub-Kelvin) soğutma teknikleridir. Tez kapsamında, kriyojenik soğutma tekniklerinin genel sınıflandırması ve tanımlanmaları yapılmıştır. Türkiye'deki kriyojenik soğutma sistemleri envanteri hakkında elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Ayrıca, kriyojenik soğutma tekniklerinin kullanım yerleri ve kullanım yerleri açısından faydalanılacak teknikler hakkında bilgiler verilmiştir. Maliyetler açısından fikir sahibi olmak adına karşılaştırma bilgisine yer verilmiştir. Firma katalog değerleri üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular ve ortaya konan sonuçları şöyle özetleyebiliriz: Örneğin, deneysel bir araştırmada düşük titreşimli olarak kriyojenik soğutma yapması ile ön plana çıkan kriyojenik soğutma tekniği, darbe tüplü kriyosoğutuculardır. Genel kullanım için ön plana çıkan kriyojenik soğutma teknikleri Gifford-McMahon, Stirling ve Brayton kriyosoğutucular iken, tesislerde kullanım açısından ön plana çıkan ve entegre olmaya müsait olan teknikler ise Joule-Thomson ve Claude kriyosoğutuculardır. Fiyat, kapasite gibi ölçütler göz önüne alınarak belirtilen kriyosoğutucular arasından seçim yapılabilir.

ANAHTAR KELİMELEER: Kriyojenik soğutma, Aşırı düşük sıcaklıklara soğutma, Türkiye'de kriyojenik soğutma, Joule-Thomson, Stirling

ABSTRACT

CRYOGENIC COOLING METHODS AND COMPARISON

MSC THESIS

YAVUZ OLKAY

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. OMER OZYURT)

BOLU, DECEMBER 2021

XVI + 89

Cryogenic cooling is a field of physical science research that is developing every day with the technological developments experienced and is increasing in importance. The process of its development began with the liquefaction of gases such as oxygen, nitrogen, helium, and then the first cryocooler appeared. Thereafter, cooling techniques for extremely low temperatures of different types began to appear. Cryogenic cooling techniques, as the name suggests, are systems developed to achieve cooling at extremely-low temperatures. Extremely-low temperatures refer to temperatures below the temperature of 120 K. The group of cryocooler I will mention in the scope of the thesis are dynamic cryocoolers, and the other group is static cryocoolers with a 2% utilization rate. Dynamic cryocoolers are the group I will consider because they have more widespread use. According to the type of heat exchanger, dynamic cryocoolers are divided into two subcategories: recuperative cryocoolers and regenerative cryocoolers. In addition, other techniques that I will mention are sub-Kelvin (below-Kelvin) cooling techniques that are designed to cool at ultra-low temperatures (below 1 K) and have more experimental use. Within the scope of the thesis, a general classification and definitions of cryogenic cooling techniques have been made. The findings obtained about the inventory of cryogenic cooling systems in Turkey have been shared. In addition, information is given about the techniques to be used in terms of the places of use and the places of use of cryogenic cooling techniques. Comparison information is provided in order to have an idea about the costs. Comparisons were made on the company catalog values. For example, in an experimental study, the cryogenic cooling technique that comes to the fore by performing cryogenic cooling with low vibration is pulse tube cryocoolers. The cryogenic cooling techniques that come to the forefront for general use are Gifford-McMahon, Stirling and Brayton cryocoolers, while the techniques that come to the forefront in terms of use in facilities and are suitable for integration are Joule-Thomson and Claude cryocoolers. It is possible to choose from the specified cryocoolers taking into account such criteria as price, capacity.

KEYWORDS: Cryogenic cooling, Cooling to ultra-low temperatures, Cryogenic cooling methods, Cryogenic cooling systems in Turkey, Joule-Thomson, Stirling

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ.....	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ.....	3
2.1 Kriyojeni	3
2.2 Kriyojenler	4
2.3 Kriyojeni Biliminin Tarihçesi	7
3. KRİYOJENİK SOĞUTMA TEKNİKLERİ.....	20
3.1 Kriyosoğutucular	21
3.2 Kriyojenik Soğutucuların Sınıflandırılması.....	22
3.2.1 Reküperatif Kriyosoğutucular	25
3.2.1.1 Joule-Thomson (J-T) Kriyosoğutucular	27
3.2.1.2 Brayton Kriyosoğutucular	32
3.2.1.3 Claude Kriyosoğutucular.....	34
3.2.2 Rejeneratif Kriyosoğutucular	36
3.2.2.1 Stirling Kriyosoğutucular	37
3.2.2.2 Gifford-McMahon (GM) Kriyosoğutucular	41
3.2.2.3 Vuilleumier (VM) Kriyosoğutucular.....	44
3.2.2.4 Darbe Tüplü Kriyosoğutucular.....	47
3.2.3 Orifis Darbe Tüplü Kriyosoğutucuların Analizi.....	53
<i>Entalpi ve Entropi Akış Modeli.....</i>	<i>53</i>
<i>Darbe Tüpü Kayıpları ve Başarım Sayısı</i>	<i>55</i>
<i>Fazın Akış ve Basınç Arasındaki Etkisi</i>	<i>56</i>
3.3 Ultra Düşük Sıcaklıklara (Sub-Kelvin) Soğutma Teknikleri.....	57
3.3.1 Adyabatik Demanyetizasyon Buzdolapları (ADR)	57
3.3.2 Seyreltme Buzdolapları (DR)	58
3.3.3 ³ He Sorpsiyonlu Buzdolabı	61
3.4 Kriyojenik Soğutucularda Karşılaşılabilecek Potansiyel Problemler	62
4. TÜRKİYE'DE KURULU OLAN KRİYOJENİK SOĞUTMA SİSTEMLERİ.....	63
5. KARŞILAŞTIRMA BULGULARI.....	67

5.1 Kriyosoğutucu Maliyeti ve Seçimi	67
5.2 Soğutma Kapasitesi, Sıcaklık ve Güç Tüketimi	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	78
7. KAYNAKLAR.....	81



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Helyumun P–T diyagramı	6
Şekil 3.1. Kriyosoğutma tekniklerini sınıflandırılması.....	22
Şekil 3.2. Kriyosoğutucuların eşanjör tipine göre sınıflandırılması	24
Şekil 3.3. Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu döngüsel şeması	29
Şekil 3.4. (a) J-T ve (b) Brayton kriyosoğutucu şemaları.....	32
Şekil 3.5. Brayton kriyosoğutucu çevrim şeması.....	33
Şekil 3.6. Claude kriyosoğutucu döngüsel şema	34
Şekil 3.7. Claude çevrimi T-s diyagramı	35
Şekil 3.8. Stirling kriyosoğutucu şemaları; (a), (b) ve (c)	38
Şekil 3.9. Gifford-McMahon (GM) döngüsü (tek kademeli)	42
Şekil 3.10. Vuilleumier (VM) kriyosoğutucu döngüsel şema	46
Şekil 3.11. Darbe tüplü kriyosoğutucu döngüsel şema.....	49
Şekil 3.12. Üç farklı darbe tüplü kriyosoğutucu geometrik konfigürasyonu....	52
Şekil 3.13. Birinci kanun enerji dengesi	53
Şekil 3.14. Tek aşamalı ADR şematik gösterimi	58
Şekil 5.1. Kriyosoğutucularda 10 kW Altı Kompresör Güç Girişi İçin Operasyon Sıcaklıklarında Carnot Verimi Grafiği.....	68
Şekil 5.2. Kriyosoğutucularda 80 K Sıcaklık İçin Kompresör Giriş Gücüne Bağlı Carnot Verimi Grafiği.....	69
Şekil 5.3. Çeşitli Soğutma Sistemleri İçin Sıcaklık-Soğutma Kapasitesi Grafiği.	70
Şekil 5.4. Kriyojenik Soğutma Sistemleri İçin Kullanım Yerine Göre Soğutma Gücü - Sıcaklık Haritası	71
Şekil 5.5. Kullanım Yerlerine Göre Soğutma Gücü – Sıcaklık Haritası	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Kriyojenik akışkanların (kriyojenlerin) karakteristik sıcaklıkları.....	5
Tablo 3.1. Kriyojenik soğutmanın bazı kullanım alanlarına ait uygulamalar..	20
Tablo 3.2. Soğutma kapasitelerine göre kriyosoğutucular..	25
Tablo 3.3. VM kriyosoğutucularda yaşanan gelişmeler..	45
Tablo 5.1. 20-25 K sıcaklıkta farklı GM kriyosoğutucu modellerine ait veriler..	72
Tablo 5.2. 80 K sıcaklıkta farklı GM kriyosoğutucu modellerine ait veriler..	73
Tablo 5.3. Tek kademeli farklı PTC kriyosoğutucu modellerine ait veriler. ...	74
Tablo 5.4. Farklı standart çift kademeli PTC kriyosoğutucu modellerine ait..... veriler.....	75
Tablo 5.5. Farklı 4 K çift kademeli PTC kriyosoğutucu modellerine ait..... veriler.....	76
Tablo 5.6. Ultra düşük sıcaklığa soğutma tekniklerine ait veriler.....	77

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1. Sir James Dewar ve elinde Dewar vakum yalıtımlı kabı	12
Fotoğraf 2.2. Collins helyum sıvılaştırıcı.....	15
Fotoğraf 2.3. Heinz London.....	16
Fotoğraf 2.4. Erken dönem Stirling kriyosoğutucu.....	16
Fotoğraf 2.5. Gifford-McMahon (GM) kriyosoğutucu CTI model 0120	17
Fotoğraf 2.6. Stirling kriyosoğutucu model C	18
Fotoğraf 3.1. Reküperatif ısı eşanjörü (reküperatör).....	25
Fotoğraf 3.2. WTP Reküperatif ısı eşanjörü (reküperatör).	26
Fotoğraf 3.3. Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu	27
Fotoğraf 3.4. Minyatür Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu	30
Fotoğraf 3.5. Turbo-Brayton kriyosoğutucu	32
Fotoğraf 3.6. Rejeneratif ısı eşanjörü (rejeneratör).....	36
Fotoğraf 3.7. Stirling kriyosoğutucu.	37
Fotoğraf 3.8. Minyatür Stirling kriyosoğutucu.	39
Fotoğraf 3.9. Gifford-McMahon (GM) kriyosoğutucu.	41
Fotoğraf 3.10. Vuilleumier (VM) kriyosoğutucu.	44
Fotoğraf 3.11. U tipi geometriye sahip olan bir darbe tüplü kriyosoğutucu.....	47
Fotoğraf 3.12. Minyatür ADR prototipi.....	57
Fotoğraf 3.13. Kriyojensiz (kuru) seyreltme buzdolabı iç yapısı.	60
Fotoğraf 4.1. AÜ Tarla Hızlandırıcı Sıvı Helyum Üretim Sistemi; (a) ve (b).63	
Fotoğraf 4.2. ODTÜ Merkezi Laboratuvar Stirling Sıvı Azot Üretim Sistemi64	
Fotoğraf 4.3. Prova Pulse Tube Prototipi.....	65
Fotoğraf 4.4. BAİBÜ Fen Edebiyat Fakültesi kriyostat.....	65
Fotoğraf 4.5. ODTÜ GÜNAM Fen Edebiyat Fakültesi kriyostat.....	66

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

J-T	: Joule-Thomson
GM	: Gifford-McMahon
VM	: Vuilleumier
PTC	: Darbe tüplü kriyosoğutucu
BPTC	: Temel darbe tüplü kriyosoğutucu
OPTC	: Orifis darbe tüplü kriyosoğutucu
TADOPTC	: Termoakustik tahrikli orifis darbe tüplü kriyosoğutucu
TASHE	: Termoakustik tahrikli Stirling ısı motorlu
DPTC	: Çift girişli darbe tüplü kriyosoğutucu
DR	: Seyreltme buzdolabı
ADR	: Adyabatik demanyetizasyon buzdolabı
MCE	: Manyetokalorik etki
COP	: Performans katsayısı
NIST (NBS)	: Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
APA	: Amerika Psikoloji Derneği
AÜ	: Ankara Üniversitesi
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
GÜNAM	: Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi
BAİBÜ	: Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
ABD	: Amerikan Birleşik Devletleri
CEC	: Kriyojenik Mühendislik Konferansı
ICEC	: Uluslararası Kriyojenik Mühendislik Komitesi
ICMC	: Uluslararası Kriyojenik Malzemeler Konferansı
MRC	: Kaskad (karışık soğutkan) sistemi
SQUID	: Süper iletken kuantum girişim cihazı
MRI	: Manyetik rezonans görüntüleme cihazı
HTS	: Yüksek sıcaklık süperiletkenliği
LTS	: Düşük sıcaklık süperiletkenliği
SMES	: Süperiletken manyetik enerji depolama
FCL	: Freon soğutkan hattı
ZBO	: Zero boil-off (Sıfır kaynama)

EMI	: Elektromanyetik girişim
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz
Ar-Ge	: Araştırma ve geliştirme
Prof.	: Profesör
Dr.	: Doktor
ark.	: Arkadaşları
Mag. Sep.	: Manyetik ayırıcı
Sep.	: Ayırıcı
elect.	: Elektronik
K	: Kelvin
mK	: Milikelvin
nK	: Nanokelvin
J	: Joule
GJ	: Gigajoule
tJ	: Terajoule
°C	: Santigrat derece
°F	: Fahrenheit
°R	: Rankine
W	: Watt
MW	: Megawatt
kW	: Kilowatt
μW	: Mikrowatt
Hz	: Hertz
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
He	: Helyum
⁴He, ³He	: Helyum izotopları
He I, He II	: Helyum formları (süperiletkenlik)
NIS	: Normal-Yalıtkan-Süperiletken
LHe	: Sıvı helyum
O₂	: Oksijen
H₂O	: Su
CO₂	: Karbondioksit
CH₄	: Metan
H₂	: Hidrojen

N₂	: Nitrojen
LN₂	: Sıvı nitrojen
ppm	: Proporsiyon birimi (milyonda bir)
atm	: Atmosfer basıncı
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
lt	: Litre
t	: Ton
dk	: Dakika
sn	: Saniye
N	: Newton
Pa	: Pascal
kPa	: Kilopascal
h	: Entalpi (kJ/kg)
s	: Entropi (kJ/kg. K)
€	: Euro (para birimi)
m	: Kütlesel debi (kg/s)
m_f	: Akışkanın kütlesel debisi (kg/s)
m_e	: Türbindeki kütlesel debi (kg/s)
T	: Sıcaklık (K)
T_L	: Düşük sıcaklık (K)
Q_L	: Düşük sıcaklık bölgesine ait birim zamandaki ısı (W)
T_h	: Yüksek sıcaklık (K)
Q_h	: Yüksek sıcaklık bölgesine ait birim zamandaki ısı (W)
T_w	: Ilık Sıcaklık (K)
Q_w	: Ilık sıcaklık bölgesine ait birim zamandaki ısı (W)
P_d	: Dinamik basınç (Pa = N/m ²)
P₀	: Ortalama basınç (Pa = N/m ²)
P₁	: Sinüzoidal basınç salınımının genliği (Pa = N/m ²)
T₀	: Ortam sıcaklığı (K)
V̇	: Hacimsel debi (m ³ /s)
V̇₁	: Sinüzoidal hacim akış hızının genliği (m ³ /s)

$\dot{W}_0$	: Birim zamandaki giriş gücü (W)
θ	: Akış ve basınç arasındaki faz açısı
$\dot{m}_1$	: Sinüzoidal kütle akış hızının genliği (kg/s)
R	: Gaz sabiti (J/kg. K)
FoM	: Başarım sayısı
$\dot{W}$	: Birim zamanda soğutma gücü (W)
$\dot{Q}_0, \dot{Q}_c, \dot{Q}$	: Birim zamanda soğutma ısısı (W)
$\dot{Q}_{max}$	: Maksimum soğutma ısısı (W)
$\langle \dot{S} \rangle$	: Birim ortalama zamanda alınan entropi akışı (W/K)
$\langle \dot{H} \rangle$	: Darbe tüpündeki zaman ortalamalı entalpi akışı (W)
$\langle \dot{H}_r \rangle$	: Mükemmel bir rejeneratör ve ideal bir gaz için rejeneratördeki zaman ortalamalı entalpi akışı (W)

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmam sırasında, benden desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer Özyurt'a, en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca, araştırma sürecim sırasında benden değerli bilgilerini esirgemeyen ve yardımcı olan Sayın Vahit Kalender Bey'e minnettarlığımı ifade ederim. Bunun yanında üzerimden maddi ve manevi desteklerini üzerimden eksik etmeyen anne ve babama teşekkürlerimi ifade etmeyi bir borç bilirim. Son olarak tezin son şeklini gözden geçirmemde yardımcı olan Kadir Özbek'e teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Kriyojenik sıcaklıklar olarak belirttiğimiz, aşırı düşük (120 K altı) sıcaklıklara soğutma yapan sistemler, kriyojenik soğutma sistemleridir. Eğer aşırı düşük sıcaklıklara soğutma, 1 K altı sıcaklıklarda yapılıyorsa, ultra düşük sıcaklıklar kavramı ortaya çıkmaktadır ve 1 K altına soğutma yapan sistemler de Kelvin-altı (sub-Kelvin) soğutma sistemleri şeklinde isimlendirilirler. Kriyojenik bilimi içerisinde önemli bir alan olan kriyojenik soğutma, kriyojenik soğutma tekniklerinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu derleme kapsamında kriyojeni, kriyojenik soğutma, kriyojenik soğutma teknikleri ve özelliklerinden, karşılaştırma kriterlerinden, ülkemizde kurulu sistemlerden bahsedilecek, ayrıca bu alanda üstün ülkelerdeki durumdan çıkarım yaparak ülkemizdeki kriyojenik soğutma alanındaki durumun nasıl daha iyi hale getirilebileceğine dair önerilerde bulunulacaktır. Kavramlar açıklanırken çeşitli görsel öğelerden faydalanılacaktır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması kapsamında ulaşılabilecek amaçlar, aşırı düşük sıcaklıklara ulaşmayı sağlayan kriyojenik soğutma sistemleri üzerinde literatür bağlamında bir inceleme yaparak elde edilen bilgilerin sentezlenmesiyle beraber; kriyojeni kavramının ortaya çıkışı, kriyojenik soğutma, kriyojenik soğutma tekniklerinin tarihsel ortaya çıkış süreci, kriyojenik soğutma tekniklerinin neler olduğu ve kullanım alanlarına değinilecek. Ayrıca kriyojenik sistemlerin daha iyi kavranılması amaçlanmaktadır. Türkiye’de kurulu kriyojenik soğutma sistem envanteri hakkında bilgi verilecek ve dünyada ön plana çıkan ülkeler vurgulandıktan sonra ülkemizin bu alanda ön plana çıkması adına, neler yapabileceğine dair görüş ve önerilerde bulunulacak. Bunun beraberinde farkındalık oluşturmak amaçlanmaktadır. Kriyojenik soğutmanın kullanıldığı belli alanlardan bahsedilecek, ilaveten Türkiye’de kullanıldığı alanlar göz önüne alınarak nerede, hangi kriyojenik soğutma sisteminin tercih önceliğine sahip olduğu vurgulanacaktır. Kriyojenik soğutma sistemi seçiminde, nasıl bir yol izlenilmesi gerektiği hakkında bilgi verilmesi yoluyla, kriyojenik soğutma sistemi seçimi yapmak isteyenlere yol göstermek amaçlanmaktadır. Ayrıca, Türkiye’deki örnek bazı kriyojenik soğutma sistemlerinin maliyetlerinden bahsedilecek, akabinde

maliyet değerlendirmesi yapılacak ve kriyojenik soğutma sistemi seçiminde kullanılan ölçütlerle değinilecek. Kriyojenik soğutma tekniklerine ait potansiyel kullanım alanları ortaya konulacak ve kriyojenik soğutma alanının ne denli önemli olduğu okuyanlara aktarılmaya çalışılacaktır.



2. LİTERATÜR BİLGİSİ

2.1 Kriyojeni

“Kriyojeni (Cryogenics)” diğerk bir deyişle “Aşırı Düşük Sıcaklıklar Fiziği” olarak tabir edilen bu kavram, aşırı düşük sıcaklıklarla ilgilenen, aşırı düşük sıcaklıklar üreten ve bu sıcaklık şartlarının organizma ve malzemeler üzerinde oluşurduğu etkiler üzerine yoğunlaşan bir araştırma bilimi ve mühendislik dalıdır (Radebaugh ve Bar-Cohen, 2016). “Kriyojeni” kelimesini etimolojik manada incelemek istersek, “Cryogenics” kelimesi Yunanca “cryos (soğuk)” öneki ve “genics (üretmek)” kelimesinin bir araya gelmesi ile ortaya çıkan “soğuk üretmek” manasında bir kelimedir. Kriyojenik mühendislik, kriyojenik sıcaklıkları üretmek için kullanılan teknolojileri kapsar. Kriyojenik mühendislik, “bir şeyleri soğutmak” olarak tanımlanan soğutmadan temelde farklı değildir. Bununla birlikte, soğutma çok daha önce ortaya çıkmıştır ve gıdaların korunmasıyla yakından ilgilidir. (Zare, 2016), (Punit ve ark., 2017), (Zhao ve Wang, 2019).

Kriyojenik sıcaklıkların tanımlanmasıyla ilgili, başlangıçta birtakım zorluklar vardı. Bu zorluklar, kriyojenik soğutmanın başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının, sayısal değer olarak netleştirilmemiş olmasıydı (Barron, 1985). Termodinamik yasalarına göre, teorikte ulaşılabilecek en düşük sıcaklığın mutlak sıfır olarak bilinen bir keskin sınırı vardır. Moleküller, mutlak sıfırda en düşük, ancak sonlu enerji halindedir. Gerekli giriş gücü sonsuza yaklaştığından böyle bir sıcaklığa ulaşmak pratikte imkansızdır. Bununla birlikte, mutlak sıfırın üzerinde bir derecenin birkaç milyarda biri kadar olan sıcaklıklara ulaşılmıştır. Mutlak sıfır, mutlak veya termodinamik sıcaklık ölçeğinin sıfırıdır. $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ veya $-459.67\text{ }^{\circ}\text{F}$ 'ye eşittir. Metrik veya SI mutlak sıcaklık ölçeği, birimi Celsius derecesi ile aynı büyüklüğe sahip olan Kelvin ölçeğidir. Kelvin ölçeğinin sembolü, 1968'de 13. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konseyi tarafından kabul edildiği gibi, $^{\circ}\text{K}$ değil, K'dir. Böylece $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 273.15 K 'ye eşittir. Rankine ölçeği olarak bilinen İngiliz mutlak ölçeği, $^{\circ}\text{R}$ sembolünü kullanır ve Fahrenheit ölçeğindekiyle aynı artışa sahiptir. (Radebaugh, 2002). Kriyojenik sıcaklık aralığının belirlenmesindeki muğlaklığı önlemek adına bazı kuruluşlar sıcaklık aralıkları tanımladılar. Colorado, Boulder'daki Ulusal Standartlar Bürosu çalışanları, kriyojenik alanını 123 K ($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) veya $-240\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($220\text{ }^{\circ}\text{R}$) altındaki sıcaklıkları içeren alan olarak değerlendirmeyi

seçtiler. Bu mantıklı bir ayırım çizgisidir, çünkü helyum, hidrojen, neon, nitrojen, oksijen ve hava gibi kalıcı gazlar olarak adlandırılan gazların normal kaynama noktaları $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındayken, Freon soğutucuları, hidrojen sülfür, amonyak ve diğer geleneksel soğutkanların tümü $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaynar (Barron, 1985). 1968 yılında düzenlenen 13. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konseyi'nde, kriyojenik sıcaklığın başlangıcı yaklaşık 120 K ($-153\text{ }^{\circ}\text{C}$) olarak belirlenmiştir ve bitiş sınırı ise konseyin tespit ettiği mutlak sıfır noktasıdır (Radebaugh, 2002).

2.2 Kriyojenler

Çalışma yapılan ortam sıcaklığı, kriyojenik bir sıcaklıkta yani 120 K 'nin altındaki sıcaklıklarda ve soğutma yapılıyorsa, bu işlemi gerçekleştiren sistemlere kriyojenik soğutma sistemleri denir. Kriyojenik soğutma sistemlerinin soğutma yapabilmek için faydalandığı soğutucu akışkanlara ise kriyojen veya kriyojenik akışkan adı verilmektedir (Karabuğa, 2016).

Kriyojenlerin ortak özellikleri, esasen atmosfer şartları altında, gaz fazında bulunmaları ve termodinamik işlemler sonucu yoğunlaşma sıcaklık noktasının altına düşürülerek sıvı formda elde edilmeleridir (Karabuğa, 2016).

Kriyojenik sıvılar, atmosfer basıncında, 273 K 'in altındaki sıcaklık değerlerinde, normal kaynama sıcaklığına sahip sıvılardır. Bu tanımlamaya azot, helyum, oksijen, neon, hidrojen, argon, kripton, xenon, metan, etan ve propan dâhildir. Ancak karbondioksit sıvı forma geçebilmek için 5 atmosfer basıncının üstündeki basınçlara ihtiyaç duymaktadır. Kriyojenik sıvıların reaktivitesi, soy gazlarda patlama potansiyeli olan hidrojen, hidrokarbonlara ve çok tehlikeli reaktif sıvı oksijene kadar çeşitlenmektedir (Weisend, 1998).

Çoğu durumda, yüksek sıcaklıklı süperiletkenleri soğutmak için sıvı nitrojen kullanılırken, diğer taraftan düşük sıcaklıklı süper iletkenleri soğutmak için de sıvı helyum kullanılır. Sıvı helyumdan bile çok daha pahalı olmasına rağmen, sıvı neon bazen 25 ila 30 K civarında sıcaklıklara ulaşmak için kullanılabilen bir kriyojendir (Radebaugh, 2020).

Bir kriyojenik sıvı ile bir ekipmanı soğutmanın en basit yolu, onun gizli buharlaşma ısını kullanmaktır. Kaynar sıvı banyosuna daldırma işlemi, buna örnek olarak verilebilir. Sonuç olarak, kriyojenik sıvıların yararlı sıcaklık aralığı,

içinde buharlaşma gizli ısısının bulunduğu, yani üçlü nokta ile kritik nokta arasında ve normal kaynama noktasına diğer bir ifadeyle atmosfer basıncında doyma sıcaklığına, özel bir ilginin olduğu aralıktır. Aşağıda Tablo 2.1'de bazı kriyojenlere ait üçlü nokta, normal kaynama noktası ve kritik nokta sıcaklıkları verilmiştir (Lebrun, 2007).

Tablo 2.1. Kriyojenik akışkanların karakteristik sıcaklıkları (* = λ noktası: Normal sıvı helyumun süperakışkan helyum II'ye geçiş yaptığı sıcaklıktır.) [Lebrun, 2007].

Kriyojen	Üçlü nokta	Normal kaynama noktası	Kritik nokta
Metan	90.7 K	111.6 K	190.5 K
Oksijen	54.4 K	90.2 K	154.6 K
Argon	83.8 K	87.3 K	150.9 K
Nitrojen	63.1 K	77.3 K	126.2 K
Neon	24.6 K	27.1 K	44.4 K
Hidrojen	13.8 K	20.4 K	33.2 K
Helyum	2.2 K*	2.4 K	5.2 K

Özellikle iki kriyojene odaklanmakta fayda vardır. Bunlar: çok düşük sıcaklıktaki tek sıvı olan helyum ve geniş kullanılabilirliğe sahip olan, ön soğutma ekipmanı ve termal koruma için kullanım kolaylığı sağlayan nitrojendir (Lebrun, 2007).

Helyum, soy gazlar ailesinin bir üyesidir. Hidrojenden sonra en hafif gazdır. Renksiz, kokusuz olmasının yanı sıra, soy gazların özelliğinden dolayı kararlı yani, tepkimeye girmeyen, bilinen hiçbir elementle bileşik yapmayan, eylemsiz bir gazdır. Çevre şartlarında, atmosfer basıncında ve 22°C sıcaklığında, sadece gaz fazında bulunmaktadır. Ancak kriyojenik işlemler sonrasında sıvı ve katı formda da gözlelenebilmektedir. Lakin helyum, atmosfer basıncında ve düşük sıcaklıklarda katılaştırılamayan tek elementtir (Karabuğa, 2016).

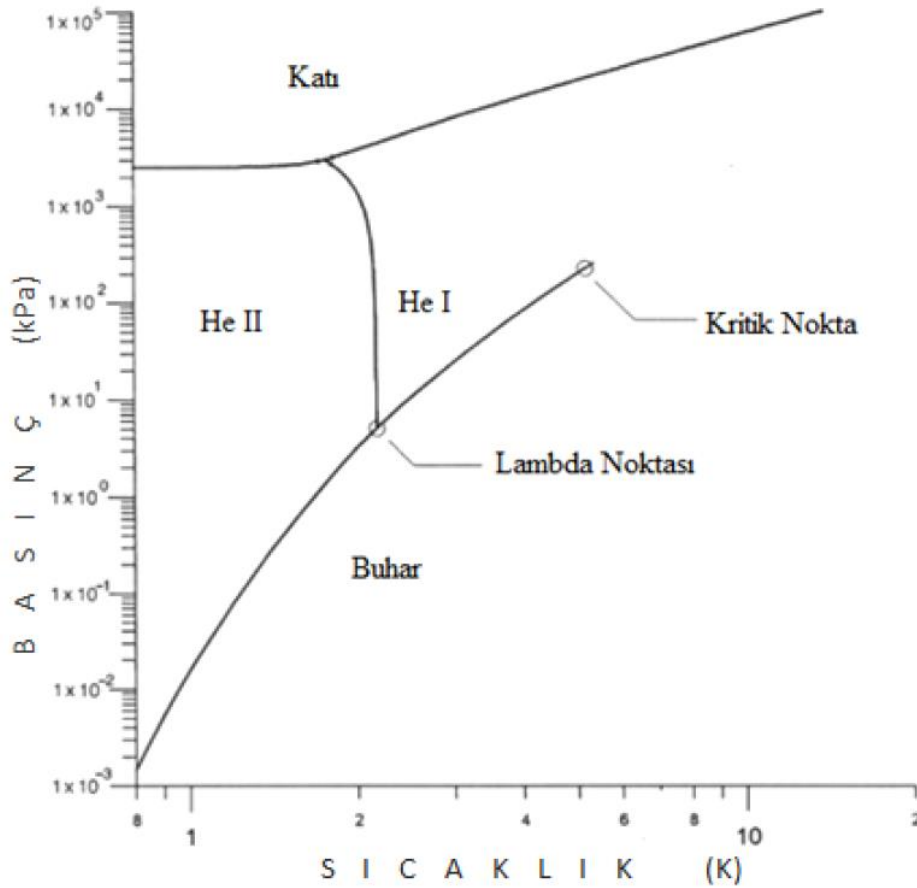
Helyum birkaç farklı yolla elde edebilir:

- Havanın damıtılması yöntemiyle elde edilebilir. Fakat havada, düşük miktarda yani yaklaşık olarak 5 ppm seviyelerinde bulunması işlemi zorlaştırır.
- Uranyum ve toryum gibi radyoaktif minerallerden elde edilir.

- Bazı doğal gaz yataklarında %7 oranında helyum bulunmaktadır.

Helyumun bilinen 9 izotopu vardır, ancak bunlardan sadece iki tanesi karardlıdır. Karardlı olan bu izotoplar ise ^3He ve ^4He 'dür. ^4He izotopu, doğada, helyumun doğal olarak en çok bulunan izotopudur. ^3He izotopu ise, radyoaktif olmayan ve helyumun diğler izotoplarına göre daha hafif yapıda bir izotoptur. Dünyada çok az bulunan bu izotop, nükleer araştırmalar sonucu bulunmuştur (Karabuğ, 2016).

Şekil 2.1'de helyumun basınç ve sıcaklık diyagramı gösterilerek He I ve He II formlarının yerleri belirtilmiştir.



Şekil 2.1. Helyumun P-T diyagramı [Weisend, 1998].

2.3 Kriyogeni Biliminin Tarihçesi

Kriyogeni bilimi ve kriyojenik soğutmanın gelişimine zemin hazırlayan önemli bazı tarihsel gelişmeler ve bu gelişmelere zemin hazırlayan basamaklar aşağıda verilmiştir:

- 1748'de, William Cullen, etil eterin bir vakumda kaynamasına izin vererek yapay soğutma ilkesini gösteren ilk kişiydi (Chambers ve Thomson, 1855), (Zhao ve Wang, 2019).
- 1805 yılında, “Soğutmanın Büyükbabası” olarak anılan Oliver Evans, “Buhar-Sıkıştırılmalı Döngü” fikrini ortaya attı. Ayrıca, kendisi bir soğutma döngüsünün tüm ana bileşenlerini (örneğin, kompresör ve kondansatör, soğutma bobini, genişletirici, buharlaştırıcı) tanımlayan bir buhar sıkıştırılmalı buzdolabı için ilk ayrıntılı, teorik ve tutarlı olan tasarımı geliştiren bilim insanıdır (Zhao ve Wang, 2019).
- 1816 yılında, ilk rejeneratif ısı eşanjörü Robert Stirling tarafından icat edildi (Stirling, 1817), (Radebaugh, 2007).
- 1817 yılında, Robert Stirling, Stirling döngüsünü geliştirdi (Stirling, 1817), (Radebaugh, 2007).
- Düşük sıcaklık bilimi olarak kriyogeninin gelişimi, 19. yüzyıl bilim insanlarının kalıcı gazları sıvılaştırma girişimlerinin doğrudan bir sonucudur. Bu bilim insanlarından İngiliz kimyagerler Sir Humphry Davy ve Michael Faraday, 1823 ve 1845 yılları arasında, düşük sıcaklık fiziğinde öncü çalışmaları yürüttüler ve böylece kriyogeni biliminin gelişmesi sürecinde, önemli adımlar atmış oldular. Davy ve Faraday, ters çevrilmiş V şeklinde kapalı bir tüpün bir ucunda, uygun bir karışımı ısıtarak gaz ürettirler. Diğer ucunu ise, bir tuz-buz karışımını içinde soğuttular. Düşen sıcaklık ve artan basınç kombinasyonu, gelişen gazın sıvılaşmasına neden oldu. Tüp açıldığında sıvı hızla buharlaştı ve normal kaynama noktasına kadar soğutuldu. Eter ile karıştırılmış katı karbondioksiti düşük basınçta buharlaştırarak, Faraday, yaklaşık 163 K (yaklaşık -110 °C) sıcaklığa ulaşmayı başardı. Başlangıçta, orta sıcaklıkta olan bir gaz, bir valften genişletirilirse, sıcaklığı artar. Ancak, başlangıç sıcaklığı ters çevirme sıcaklığının altındaysa, genişleme “Joule–Thomson etkisi” olarak adlandırılan bir şeyin sonucu olarak sıcaklıkta bir azalmaya neden olacaktır.

Bir anlamda, gazın çekici atomlar arası kuvvetlere karşı "iç iş" yapmasını sağlama yöntemi olarak görülebilir. Bu nedenle, teknik ideal bir gaz için işe yaramaz. Ancak gerçek gazlarda, farklı gazlar için farklı olan başlangıç sıcaklığının inversiyon sıcaklığından daha düşük olması koşuluyla soğutma elde edilebilir (Bunkov, 2009). 1845 yılına kadar geçen süreçte, Faraday, o dönemde bilinen kalıcı gazların tamamına yakını sınıvlandırdı (Ventura ve Risegari, 2007), (Radebaugh ve Bar-Cohen, 2016).

- 1824 yılında, Fransız askeri mühendis ve fizikçi Nicolas Léonard Sadi Carnot tarafından, buharlı motor verimliliği üzerine yürütülen çalışma ile Carnot döngüsünün temellerini ortaya atıldı. Yayımladığı “Ateşin Motive Gücü Üzerine Düşünceler” monografisinde, ısı motorlarının maksimum verimliliğine ilişkin ilk başarılı teoriyi sundu ve Carnot döngüsünü ortaya çıkarttı. Sadi Carnot “Termodinamiğin Babası” ünvanını kazandı. Eğer kendisinin 36 yaş gibi, çok erken bir yaşta vefat etmemiş olsa, ısı yasalarını çok daha erken anlaşılabilirdi (Zhao ve Wang, 2019).
- 1834 yılında, İngiltere'ye taşınan bir Amerikalı olan Jacob Perkins, Faraday sıvılaştırma ve genişleme sürecinin, sürekli olarak nasıl gerçekleştirileceğini gösterdi (Scott, 1959). Bu gelişme, günümüz buhar sıkıştırma buzdolaplarının başlangıcıydı. Perkins buzdolabı, etil eter ile kullanılmak üzere tasarlanmıştı. Ancak, 1834 yılındaki bu keşfin hemen ardından, John Hague tarafından icat edilen gerçek buzdolabı, küçük miktarlarda buz üretmek için, o sırada kolayca bulunabilen Hindistan kauçuğunun bir distilatı olan kaoutchoucine kullanıyordu (Radebaugh, 2007).
- 1834 yılında, John Herschel, Stirling döngüsünü tersine çevirmeyi ve onu buz üretmek için bir buzdolabı olarak kullanmayı önerdi (Herschel, 1850), (Radebaugh, 2007).
- 1840'larda Floridalı, Apalachicola'lı bir doktor olan Dr. John Gorrie, sıtma hastalarının acılarını dindirmek amacıyla, buz üretimi yapmak üzere bir genişleme motoru geliştirdi. Dr. Gorrie'nin motoru, sadece hasta odalarının iklimlendirilmesi amacıyla havayı soğutmak için kullanılmasına ve bir kriyojenik sistemin parçası olmamasına rağmen, günümüzde çoğu büyük ölçekli hava sıvılaştırma sistemi, örneğin, havanın sıvılaştırılabilmesi amacıyla havadan enerji çıkarmak için genişleme motoru veya genişleme

türbini gibi bir iş üreten cihaz aracılığıyla havayı genişletme işlemleri de aynı prensipten faydalanır (Barron, 1985). Gorrie, buz üretebilen ilk pratik, kullanışlı buhar sıkıştırırmalı buzdolabı olarak tasarlanmış olan bu konsepti (en eski "kriyojensiz" buzdolaplarından biriydi) ile 1848 yılında patent başvurusunda bulundu ve 1851 yılında “Yapay Buz Üretimi için Geliştirilmiş Süreç” başlığı altında, makinesinin patentini aldı. Böylece geri kazanımlı, tek karşı akışlı ısı eşanjörü konsepti de geliştirilmiş oldu (Gorrie, 1992), (Radebaugh, 2007), (Zhao ve Wang, 2019).

- 1852'de James Prescott Joule ve William Thomson (Lord Kelvin), Joule-Thomson (J-T) etkisi kavramını ortaya attılar (Scurlock, 1992), (Radebaugh, 2007).
- 1857 yılında, mühendis ve iş insanı Carl Wilhelm Siemens, ilk reküperatif ısı eşanjörünü geliştirdi. Bu keşif, 1851 yılındaki John Gorrie'nin geliştirdiği geri kazanımlı, tek karşı akışlı ısı eşanjörü konseptinin rafine edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Siemens'in reküperatif ısı eşanjörleri, Hampson'ın, daha önceleri, oksijeni önceden soğutmak için kullanılan kademeli banyoları, reküperatif ısı eşanjörü ile değiştirdiği 1895 yılına kadar, çok az kullanıma sahipti (Siemens, 1992), (Walker, 1983), (Radebaugh, 2007).
- 1861 yılında, Alexander Kirk, John Herschel'in ortaya attığı “Stirling çevrimini ters çevirip buz makinesi olarak kullanma” önerisini hayata geçirmeyi başardı ve kendisini ürettiği buz makinesi “Kirk Buz Makinesi” olarak adlandırıldı (Kirk, 1862), (Kirk, 1974), (Radebaugh, 2007).
- 1867 yılında, Fransız fizikçi Louis Paul Cailletet tarafından, sıkıştırma ve hızlı genleşme tekniğini kullanılarak metan, ilk kez 112 K sıcaklıkta, küçük damlacıklar halinde sıvılaştırıldı (Haselden, 1992), (Radebaugh, 2007).
- 1872 yılında, ABD'de, G. B. Brayton tarafından Brayton döngüsünün patenti alındı (Ventura ve Risegari, 2007).
- 1877 yılında, Fransız fizikçi Louis Paul Cailletet, oksijeni sıvılaştırdığını açıkladı. Cailletet, kalın duvarlı cam bir kapiller tüp kullandı ve oksijen gazıyla dolu bir kabı yaklaşık 300 atm'de önceden soğutarak ve aparat üzerindeki bir valfi açarak gazın aniden genişlemesine izin vererek, sıvı oksijen damlacıklarından oluşan bir sis üretti. Burada oksijen soğutulurken

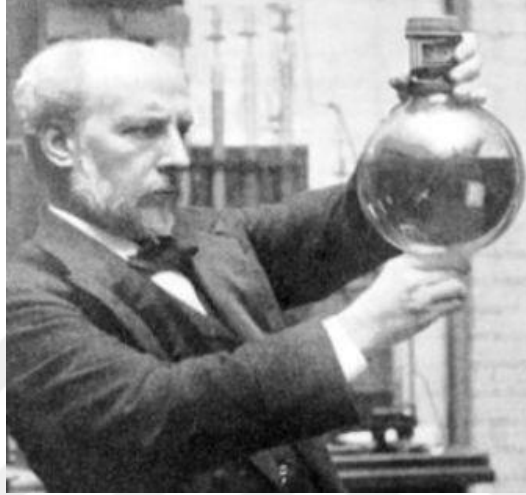
sülfürik asit ise buharlaştırıldı. Hemen hemen aynı zamanlarda, İsviçreli bir fizikçi olan Raoul-Pierre Pictet, sülfürik asidi buharlaştırarak oksijeni 200 bar'a basınçlandırdı ve ardından kuru buzun süblimasyonu ile 173 K'de soğutarak oksijeni sıvılaştırdı. Yani, kademeli bir işlemle, sıvı oksijen üretmeyi başardı. Cailletet ve Pictet, oksijeni Joule-Thomson etkilerini basamaklayarak, soğutmak suretiyle sıvılaştıran (birkaç damlacık) ilk bilim insanları oldular. Bu gelişmeyle beraber, 1877 yılı, kimi önemli bilim çevrelerince, kriyojeni biliminin başlangıcı olarak değerlendirilmektedir (Cailletet, 1885), (Barron, 1985), (Karabuğa, 2016), (Zhao ve Wang, 2019).

- 1882 yılında, uygulamalı fizik profesörü Heike Kamerlingh Onnes tarafından, Hollanda Leiden Üniversitesi'nde, ilk kriyojeni laboratuvarı inşa edildi. Bu laboratuvarın kuruluş amacı, kriyojenik sıvıların ve gazların genel termodinamik özelliklerini ve izotermelerin durum denklemlerini açıklamaya çalışmaktır. Bu laboratuvar, önde gelen kriyojenik merkezlerden biri haline geldi ve elli yılı aşkın bir süre boyunca da böyle kaldı (Zindani & Kumar, 2020), (Karabuğa, 2016).
- 1880'lerin başında, Zygmunt Florenty Wróblewski ve Karol Olszewski tarafından, Polonya'daki Cracow Üniversitesi Fizik Laboratuvarı, ilk düşük sıcaklıklı fizik laboratuvarlarından biri olarak inşa edildi (Barron, 1985).
- 1883'te, Polonyalı fizikçiler Zygmunt Florenty Wróblewski ve Karol Olszewski, oksijeni ölçülebilir düzeyde sıvılaştırarak bariz miktarda sıvı oksijen üreten ilk bilim insanları oldular. Aynı yıl içinde, nitrojeni de sıvılaştırdılar. Oksijen ve nitrojeni gerçek sıvılar (sadece sıvı damlacıklarından oluşan bir sis değil) olarak elde etmeyi başardılar. Wróblewski ve Olszewski, Cailletet'in genişletme tekniğiyle, hidrojeni sıvılaştırmaya çalıştılar. 1884 yılında, Wróblewski, önce bir kılcal borudaki hidrojeni sıvı oksijen sıcaklıklarına soğuttu, ardından aniden 100 atm'den 1 atm'ye genişletti ve sıvı hidrojen damlacıkları sisi elde etti, ancak tamamen sıvı halde hidrojeni elde edemedi. Cracow Üniversitesi Laboratuvarı'ndaki, Polonyalı bilim adamları, öncelikle sıvılaştırılmış gazların fiziksel özelliklerini belirlemekle ilgilendiler. Ortamdan ısı transferi dolayısıyla oluşan problemler, Polonyalı araştırmacıları rahatsız etti. Çünkü kriyojenik sıvılar, kaynamadan önce sadece kısa bir süre için tutulabiliyordu. Bu durumu iyileştirmek için Cracow'da ustaca bir deneysel teknik geliştirildi.

Bir kriyojenik sıvı içeren deneysel test tüpü, bir ucu kapalı olan bir dizi eş merkezli tüp ile çevrelenmiştir. Sıvıdan çıkan soğuk buhar, tüpler arasındaki dairesel boşluklardan aktı ve soğuk test tüpüne doğru hareket eden ısıнын bir kısmını yakaladı. Bu buhar koruma konseptinden, günümüzde sıvı helyumun toplu miktarlarda uzun süreli depolanması için kullanılan yüksek performanslı yalıtımlar şeklinde faydalanılmaktadır (Barron, 1985), (Zhao ve Wang, 2019).

- 1892 yılında, Londra'daki Kraliyet Enstitüsü'nde, kimya profesörü olan James Dewar'ın, kriyojenik sıvı depolama için vakum yalıtımlı kabı geliştirmesiyle beraber, kriyojenik sıvıların muhafaza edilmesi için ileriye dönük dev bir adım atılmış oldu. Dewar, iç yüzeyleri gümüşlenmiş (bugünkü termos şişelerine benzer) çift duvarlı bir cam kap kullanmanın, depolanan sıvının buharlaşma hızında, yalıtılmamış bir kaba göre, 30 kat azalmaya sebep olduğunu tespit etti (Barron, 1985), (Zhao ve Wang, 2019).
- 1894 yılında, Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes, MRC (kaskad - karışık soğutkan) prensibini kullanarak çalışan ilk sıvı hava tesisini kurdu. Böylece 40 K sıcaklıklara ulaşmakla kalınmamış, ayrıca ilk kez hava da sıvılaştırılmış ve bileşenlerine ayrılmış oldu. Tesis sonraki yıllarda, saatte 14 litre sıvı hava üretebilir seviyeye ulaştı (Bunkov, 2009), (Zhao ve Wang, 2019).
- 1895 yılında, Almanya'da Münih Politeknik Enstitüsü'nde, bir profesör olan Karl von Linde, hava sıvılaştırıcı üretti. Ayrıca 1895 yılında, William Hampson ve Carl von Linde birbirlerinden bağımsız olarak hava sıvılaştırma döngüsü patentlerini aldılar ve Linde-Hampson döngüsü kavramı ortaya çıktı. Sonraki süreçte, Linde'nin hava sıvılaştırıcısı, Hampson'un hava sıvılaştırıcısından daha yüksek miktarda hava sıvılaştırdı. Linde'nin düzeneği bir kompresör, ters akışlı ısı eşanjörü ve Joule-Thomson genleşme valfinden oluşuyordu. Linde'nin hava sıvılaştırma işlemi, havayı önce sıkıştırma ve daha sonra genişlemesine izin vererek sıvılaştırma işlemine dayanıyordu. Linde, yütümüş olduğu çalışmalarla beraber, şimdilerde düşük sıcaklıklı ekipmanların tasarımı ve yapımında ünlü olan Alman Linde Şirketi'nin, temelini attı (Walker, 1983).

- 1898 yılında, İngiliz kimyager Sir James Dewar, sıvı sisi içerisinden çekerek sıvılaştırma yerine kendi icadı olan Dewar vakum yalıtımlı kabı ile hidrojeni sıvılaştıran ilk bilim insanı oldu. Bu basit kap, hidrojen ve helyumun toplu miktarlarda sıvılaştırılmasında önemli bir rol oynadı (Barron, 1985), (Radebaugh, 2007), (Bunkov, 2009), (Karabuğa, 2016), (Zhao ve Wang, 2019). James Dewar, elinde kendi icadı olan, Dewar vakum yalıtımlı kabı ile gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.1. Sir James Dewar ve elinde Dewar vakum yalıtımlı kabı

[<https://www.worldofchemicals.com/Article/494/James%20Dewar.jpg>].

- 1894'te, Heike Kamerlingh Onnes, Hollanda'daki Leiden Üniversitesi'nde Fizik Laboratuvarı'nı kurdu (Barron, 1985), (Radebaugh, 2007).
- 1894'de, Heike Kamerlingh Onnes, "kriyojenik" sıfatını ilk kez "Leiden'deki Kriyojenik Laboratuvarda Çok Düşük Sıcaklıkların Üretimi Hakkında" başlıklı bir makalede kullanarak ortaya atan ilk kişidir ve kendisi kriyojeni kavramını, çok daha düşük sıcaklıklar üretme sanatı ve bilimini tanımlamak için kullandı (Onnes, 1894), (Radebaugh, 2002), (Radebaugh, 2007).
- 1895'te, Linde, Almanya'da hava sıvılaştırma konusunda temel bir patent aldı (Barron, 1985).
- 1898'de, Dewar, Londra Kraliyet Enstitüsü'nde öncekinden daha yüksek düzeyde sıvı hidrojen üretti (Zhao ve Wang, 2019).

- 1902 yılında, Claude ve Delorme, Fransa'da "L'Air Liquide" şirketini kurdular ve Claude, genişleme motoru kullanan bir hava sıvılaştırma sistemi geliştirdi (Barron, 1985), (Ventura ve Risegari, 2007).
- 1906 yılında, Heike Kamerlingh Onnes, Leiden Üniversitesi Kriyojenik Laboratuvarı'nda, önceden geliştirmiş olduğu ve Dewar'ın keşfetmiş olduğu hidrojen sıvılaştırıcıdan farklı olarak çalışan hidrojen sıvılaştırıcıyı, tam anlamıyla faaliyete geçirdi. Onnes'in hava sıvılaştırıcısı, saatte 4 litre sıvı hidrojen ürettiyordu ve çok geçmeden, yapılan iyileştirmelerle beraber hidrojen sıvılaştırıcıda sıvılaştırılan hidrojen miktarı, saatte 13 litre düzeyine güncellendi (Zhao ve Wang, 2019).
- 1907 yılında, Linde, Amerika'daki ilk hava sıvılaştırma tesisinin temelini attı ve 1912 yılında tamamlandı (Barron, 1985).
- 1908 yılında, Heike Kamerlingh Onnes, sıvılaştırması en zor olan gazlardan birisi olan helyumu, 4.2 K sıcaklıkta sıvılaştırdı. Böylece Onnes, helyumu sıvılaştırmayı başaran ilk bilim insanı oldu ve 1913 yılında bu başarılarından ötürü kendisine Nobel Ödülü verildi (Radebaugh, 2007), (Punit ve ark., 2017). Onnes'in bu alanda açtığı yol ile beraber, aşırı düşük sıcaklıklarda sıvılaştırma alanı üzerine ilgi arttı ve çok sayıda bilimsel çalışma ortaya çıktı (Bunkov, 2009).
- 1910 yılında, Heike Kamerlingh Onnes, bir sıvı helyum kabının üzerindeki basıncı düşürerek helyumu katılaştırmaya yönelik başarısız bir girişimde bulundu. Ancak bu girişimi neticesinde, 1.04 K gibi bir sıcaklığa ulaşmayı başarmış oldu (Barron, 1985).
- 1911 yılında, Heike Kamerlingh Onnes yönetiminde, Gilles Holst tarafından yürütülen civa deneyi ile süperiletkenlik keşfedildi (Ganni ve Fesmire, 2012).
- 1918 yılında, Rudolph Vuilleumier, Vuilleumier döngüsünün patentini aldı (Wang ve ark., 2020).
- 1926 yılında, Dr. Robert H. Goddard, Massachusetts, Auburn yakınlarındaki bir çiftlikte, sıvı-oksijen-benzin itici yakıtla çalışan bir roketle, dünyadaki ilk başarılı uçuşu gerçekleştirdi. Bu ilk uçuş sadece saniyenin %2'si kadar sürdü ve roket sadece 22 m/sn maksimum hıza ulaştı. Goddard 1930'larda çalışmalarına devam etti ve 1941 yılında kriyojenik

roketleri oldukça yüksek bir mükemmellik derecesine getirdi. Aslında Dr. Goddard'ın roket sistemlerinde kullanılan cihazların birçoğu daha sonra Alman V-2 silah sisteminde kullanıldı (Barron, 1985).

- 1927 yılında, William Francis Giaque ve Peter Debye, ultra düşük sıcaklıklar (0.1 K'den az) elde etmek için birbirlerinden bağımsız olarak adyabatik demanyetizasyon yöntemini önerdi. Bu yöntem, 1933 yılına kadar uygulanma şansı bulamadı (Barron, 1985).
- 1933 yılında, adyabatik demanyetizasyon tekniğiyle, Berkeley'de, Giaque ve MacDougall tarafından, 0.3 K ve Leiden'de De Haas, Wiersma ve Kramers aynı teknikle 0.09 K sıcaklığa ulaşıldı. İzotermal manyetizasyon ve adyabatik demanyetizasyon işlemleriyle beraber, paramanyetik tuzların adyabatik demanyetizasyonu yoluyla, 1 K'in çok altındaki ultra düşük sıcaklıklar (1933 yılında, 0.27 K) elde edildi (Debye, 1927), (Giaque, 1927), (Kurti ve ark., 1956), (Barron, 1985), (Ventura ve Risegari, 2007).
- 1934 yılında, Cambridge Royal Society Mond Laboratuvarı'nda çalışan Kapitza, Claude döngüsüne dayalı olarak 1.7 lt/saat helyumu sıvılaştıran, helyum için ilk genleşme motorunu tasarladı ve üretti. Boşaltılmış toz yalıtımı, ilk kez kriyojenik sıvı depolama kaplarında ticari ölçekte kullanılmıştır. Helyumun özelliklerini incelemek için, Moskova'da başka bir helyum sıvılaştırıcı inşa etti. 1937 yılında, Kapitza ve Allen ve diğerleri, bağımsız olarak 2.17 K'nin altındaki sıcaklıklarda, sıvı helyumun aşırı akışkanlığını keşfettiler. 1978 yılında, Kapitza, bu keşfi ve helyum sıvılaştırma teknikleri konusundaki başarıları sonucu, Nobel Ödülü'nü kazandı (Kapitza, 1934), (Allen ve ark., 1937), (Kapitza, 1938), (Allen ve Misener, 1938), (Barron, 1985), (Radebaugh, 2007).
- 1936 yılında, doğal gazı sıvılaştırmak için, Joule-Thomson kriyosoğutucularda, saf nitrojen veya argonun yerine, karışık soğutucu akışkanların kullanılması önerildi. Ama kabul görmediği için uygulanmadı (Podbielnak, 1936), (Radebaugh, 2009).
- 1937 yılında, vakumlanmış toz izolasyonları ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde, kriyojenik sıvıların toplu olarak depolanması için kullanıldı (Barron, 1985).

- 1939 yılında, sıvı oksijenin taşınması için ilk vakum tozu yalıtımlı demiryolu tank vagonu geliştirildi (Barron, 1985).
- 1941 yılında, doğal gaz (çoğunlukla metan) için kurulan ilk büyük sıvılaştırma tesisi, Cleveland, Ohio'da, 75 t/gün (1.1×10^5 m³/gün gaz, 177 m³/gün sıvı) kapasiteye sahipti. Ön soğutma için, amonyak ve etilen aşamalarına sahip kademeli bir Joule-Thomson döngüsü kullanıldı. Toplam güç girişi ise 2.4 MW idi (Clark ve Miller, 1941), (Radebaugh, 2007).
- 1946 yılında (yapımına 1935'de başlanılan), Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde, Samuel Collins tarafından, Claude döngüsünü kullanan bir helyum sıvılaştırıcı geliştirildi. Collins helyum sıvılaştırıcısı adı verilen bu sistem sayesinde, iki genişleme silindiri ve kompakt bir ters akışlı ısı eşanjörü ile herhangi bir gazı ilave soğutmaya ihtiyaç duymadan helyumu sıvılaştırmak mümkün hale geldi (Walker, 1983), (Radebaugh, 2007), (Radebaugh & Ross, 2015). Aşağıda Fotoğraf 2.2'de örnek bir Collins helyum sıvılaştırıcı gösterilmektedir.



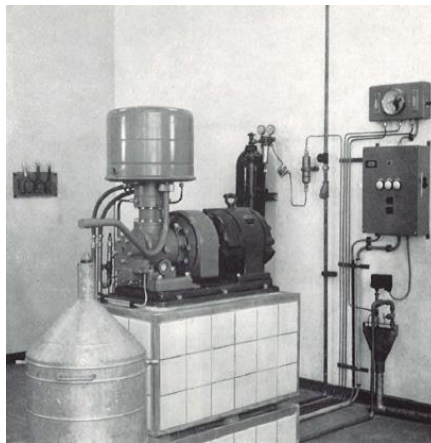
Fotoğraf 2.2. Collins helyum sıvılaştırıcı [Radebaugh, 2007].

- 1951 yılında, Heinz London tarafından, seyreltme buzdolaplarının geliştirilmesinin mümkün olduğu ve geliştirilebileceği önerilmiştir (London, 1957), (Ventura ve Risegari, 2007). Fotoğraf 2.3, Heinz London'u göstermektedir.



Fotoğraf 2.3 Heinz London [*Shoenberg, (1971). Heinz London, 1907-1970*].

- 1954 yılında, Philips Şirketi'nde, Jan Köhler önderliğinde bir grup çalışandan oluşan proje ekibi tarafından, Stirling kriyosoğutucular geliştirme üzerine çalışmalar yürütülmeye başlandı (Köhler ve Jonkers, 1954), (Walker, 1983).
- 1954 yılında, NBS-Boulder'da ilk Kriyojenik Mühendislik Konferansı (CEC) düzenlendi (Radebaugh, 2007).
- 1956 yılında, Philips Şirketi'nde, Jan Köhler liderliğindeki ekibin çalışmaları, hızlı ilerledi ve ilk ticari Stirling kriyosoğutucu ortaya çıktı. 1990'larda, Philips Şirketi, bölünene dek, Stirling kriyosoğutucuların gelişimi üzerine çalışmalar yürüttü (Walker, 1983), (Atrey, 2020). Aşağıda Fotoğraf 2.4'de, erken dönem Stirling kriyosoğutuculardan birisi gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.4. Erken dönem Stirling kriyosoğutucu [*Walker, 1983*].

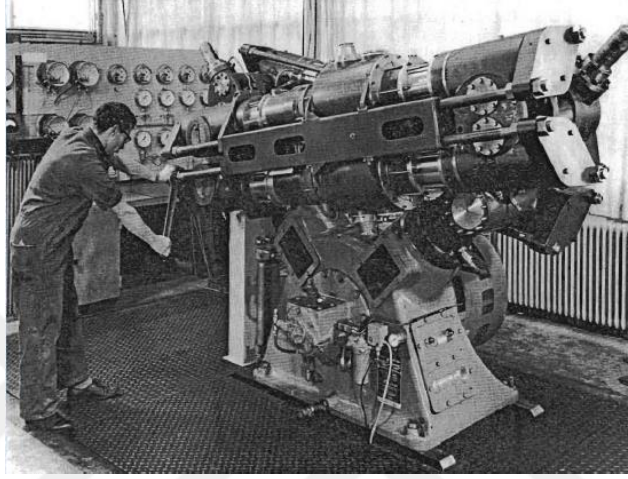
- 1956 yılında, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde, minimum bakım gerektiren ağır hizmet tipi bir makineye, özel bir vurgu yapılarak büyük bir helyum-hidrojen sıvılaştırıcı üretildi (Walker, 1983).
- 1957 yılında, Kayan ve Gates, kriyojenik ekipmanlarda kullanılan kanatçıkların performansını incelemek için, elektrik analogisini kullandılar (Kayan ve Gates, 1960), (Barron, 2007).
- 1960 yılında, William Gifford ve Howard O. McMahon'ın çalışmaları sonucu, Gifford-McMahon (GM) kriyosoğutucular ortaya çıktı (Radebaugh & Ross, 2015). Aşağıda Fotoğraf 2.5'te, 1970'li yıllarda üretilen ilk jenerasyon GM kriyosoğutucu modellerinden birisi gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.5. Gifford-McMahon (GM) kriyosoğutucu CTI model 0120 (1970'ler) (2 Kademeli) [Walker, 1983].

- 1960 yılında, William Gifford ve asistanı Charles Longworth, önemli kriyosoğutucu tiplerinden olan darbe tüplü kriyosoğutucuyu ortaya çıkardılar (Andrews, 1988).
- 1960'larda, gece görüşü ve ısı arayan füze rehberliği için kızılötesi (IR) termal görüntüleme ekipmanı üzerine artan askeri ilgi üzerine minyatür kriyosoğutuculara olan rağbet oldukça arttı (Radebaugh, 2009).
- 1960'larda, ilk Vuilleumier kriyojenik soğutucular, uzay ve askeri uygulamalarda kullanılmak için geliştirildi (Dogkas ve Rogdakis, 2018).

- 1963 yılında, William Gifford ve asistanı Charles Longsworth, bu defa, ilk ticari darbe tüplü kriyosoğutucuyu (BPTC olarak kısalttığımızı) piyasaya sürdüler (Andrews, 1988).
- 1965 yılında, Philips Şirketi, bu kez de daha yüksek verime sahip olan (Carnot verimi %41) Stirling kriyosoğutucu model C'yi tanıttı (Radebaugh & Ross, 2015). Fotoğraf 2.6'da, Stirling kriyosoğutucu model C'yi gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.6. Stirling kriyosoğutucu model C [Walker, 1983].

- 1966 yılında, Stirling kriyosoğutucular kızılötesi termal dedektörlerin soğutulması için kullanılmaya başlandı.
- 1967 yılında, İngiliz Kriyojenik Konseyi kuruldu (Kellner & Scurlock, 1971).
- 1969 yılında, Daunt ve Goree, ABD Deniz Kuvvetleri Deniz Araştırmaları Ofisi için minyatür kriyojenik buzdolapları üzerinde bir araştırma yaptı (Walker, 1983).
- 1970'lerde (1951'de önerilen), gerçekleşen ve kriyojenik tarihinin önemli başarıları arasında sayılabilecek bir gelişme de seyreltme buzdolabının geliştirilmiş olmasıdır (Ventura ve Risegari, 2007).
- İlk olarak 1970'ler ve 1980'lerde (1936 önerilmesine rağmen), küçük Joule-Thomson kriyosoğutucularda karışık soğutkanların kullanımı, Sovyetler Birliği tarafından sınıflandırılmış programlar altında geliştirilmiştir. 1980'lerin sonuna doğru, diğer ülkelerde de uygulanmaya başlanmıştır (Little, 1988), (Radebaugh, 2009).

- 1972 yılında, Donabedian tarafından, uzay kaynaklı sistemler için çok kapsamlı bir kriyojenik soğutma teknikleri araştırması yapılmıştır (Walker, 1983).
- 1974 yılında, yeni düşük sıcaklığa sahip malzeme özellik bilgilerine odaklanılmak suretiyle, elde edilen bilgilerin, etkin bir şekilde yayılmasını sağlamak amacıyla, Uluslararası Kriyojenik Malzemeler Konferansı (ICMC) oluşturulmuştur (Reed, 2007).
- 1983 yılında, Gifford-McMahon kriyosoğutucu tabanlı kriyopompalar keşfedildi (Radebaugh, 2009), (Radebaugh & Ross, 2015).
- 1984 yılında, Mikulin ve ark. tarafından, orifis eklenerek yapısı iyileştirilen BPTC'ler, orifis darbe tüplü kriyosoğutucular (OPTC) olarak anılmaya başlandı (Radebaugh, 2013).
- 1985 yılında, OPTC'ler, Ray Radebaugh ve arkadaşları tarafından daha da ileriletildi ve 1990'larda ise 40 K altı sıcaklıklara ulaşır hâle geldiler (Radebaugh, 2013).
- 1985 yılında, Gifford-McMahon kriyosoğutucular, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sistemlerinde süper iletken mıknatıslarda kullanılan kalkanları 15 K'e soğutmak için kullanılmaya başlandı (Ackermann ve ark., 1999), (Radebaugh, 2009).
- 1980'lerin ortalarında, ilk kriyojenik parçacık dedektörü konseptleri, deneysel olarak doğrulanmıştır (Twerenbold, 1996).
1980'lerde, uzay uygulamaları için kriyosoğutucuların geliştirilmesi üzerine ciddi araştırmalar ve geliştirmeler yapıldı (Radebaugh, 2009).
- 1990 yılında, Zhu ve ark., darbe tüplü kriyosoğutuculara, çift girişli hale getirdiler ve çift girişli darbe tüplü kriyosoğutucular (DPTC) ortaya çıktı (Zhu ve ark., 1990), (Radebaugh, 2009).
- 1991 yılında, ilk uzun ömürlü kriyosoğutucu uzaya uçtu (Radebaugh, 2009).
- 1990'larda, Gifford-McMahon kriyosoğutucularda, nadir toprak rejeneratör matris malzemeleri kullanılarak çok sayıda bilimsel çalışma gerçekleştirildi (Atrey, 2020).

3. KRİYOJENİK SOĞUTMA TEKNİKLERİ

Kriyojenik soğutma teknikleri, çoğunlukla kriyojenik akışkan veya kriyojen olarak tabir edilen soğutucu akışkanlar aracılığıyla, aşırı düşük sıcaklara soğutma yapılan tekniklerdir. Bu işlemler sırasında kullanılan kriyojenik akışkanlar sıvı veya gaz formundadır. Başlıca kriyojenleri; metan, helyum, oksijen, argon, hidrojen, neon, nitrojen ve karbondioksit şeklinde sayabiliriz (Gantz, 2015). Ayrıca, MRC teknolojisi ile geliştirilen karışık soğutkanlar da kriyojenik soğutma sistemlerinde kendine yer bulmaktadır. Örneğin; J-T kriyosoğutucular içinde Kleemenko kriyosoğutucular olarak adlandırılan kriyosoğutucularda, karışık soğutkanlar kullanılmaktadır. 1 K altı kriyojenik sıcaklıklara erişmek için kullanılan kriyojenik soğutma teknikleri ise ultra düşük sıcaklıklara (sub-Kelvin) soğutma teknikleri olarak adlandırılmaktadır.

Kriyojenik soğutma, birçok farklı alana ait çok sayıda uygulamada kendine yer edinmektedir ve bazı uygulamalar aşağıda Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Kriyojenik soğutmanın bazı kullanım alanlarına ait uygulamalar
[Radebaugh, 1997].

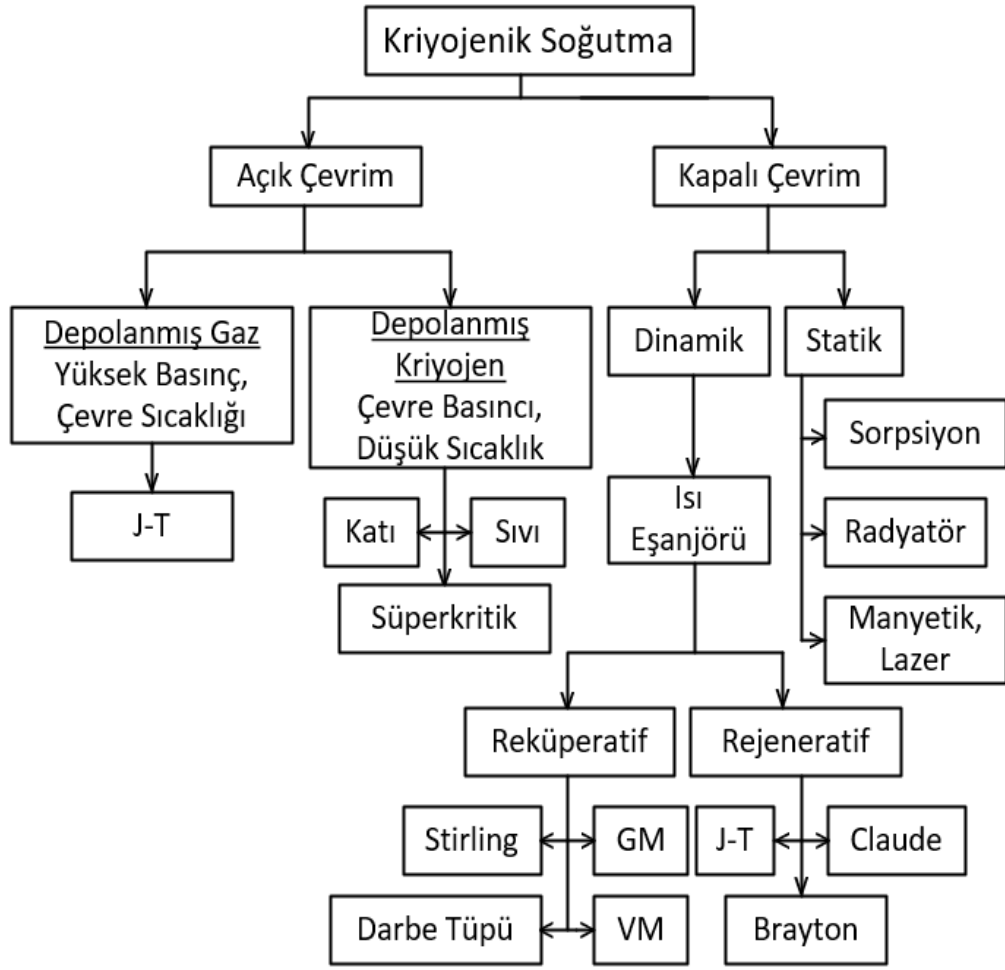
Alan	Uygulama
Askeri	• Gece görüş ve kurtarma için kullanılan kızılötesi sensörlerde • Uydu destekli izleme için kullanılan kızılötesi sensörlerde
Polisiye ve Güvenlik	• Gece görüş ve kurtarma için kullanılan kızılötesi sensörlerde
Çevre	• Ozon deliği ve sera etkisi ile ilgili atmosferik çalışmalar için kullanılan kızılötesi sensörlerde • Kirlilik izleme için kızılötesi sensörlerin kullanımında
Ticari	• Yarı iletken üretimi için kriyopompa kullanımında • Cep telefonu baz istasyonları için HTS kullanımında • Voltaj standartları için süperiletken kullanımında • Yüksek hıza sahip bilgisayarlar için kullanılan süperiletkenlerde • Proses izleme için SQUID ve kızılötesi sensör kullanımında
Medikal	• MRI sistemlerde süperiletken mıknatısları soğutmada • Kalp ve beyin operasyonları için SQUID manyetometrelerin kullanımında • Hastane ve evlerde oksijen sıvılaştırma işlemleri için kullanma • Kriyojenik kateterlerde ve kriyocerrahide
Ulaşım	• Filo araçları için LNG kullanımında • Manyetik olarak hareket ettirilen trenlerde kullanılan süperiletken mıknatıslarda
Enerji	• PV sistemlerde yoğun saatlerde takviye amaçlı LNG kullanımında • Termal kayıp ölçümleri için kızılötesi sensörlerin kullanımında • HTS’ler için güç uygulamalarında
Tarım ve Biyoloji	• Canlı hücrelerin ve biyolojik örneklerin saklanması

3.1 Kriyosoğutucular

Kriyosoğutucular (kriyojenik soğutucular) ya da bir diğer ismiyle yüksek soğutmalı buzdolapları, kriyojenik sıcaklıklara ulaşmak için, özel olarak tasarlanmış araçlardır. Diğer bir ifadeyle, bir döngü çerçevesinde çalışan ve aşırı düşük sıcaklıklar üreten mekanik cihazlardır. Tüm mekanik kriyosoğutucular, temel olarak bir gazı, yüksek basınçtan düşük basınca genişleterek soğutma üretirler. Bu süreç, aynı zamanda “Simon genişlemesi” olarak da adlandırılır. Tipik olarak bilimsel uygulamalarda ve mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Aşırı düşük sıcaklıklara ulaşmaktaki esas amaç, bir organizma veya maddeyi, sıradan gazların bile sıvı halde bulunduğu sıcaklıklara soğutmaktır. Burada bahsedilen soğutma işlemi, bir soğutma döngüsü çerçevesinde gerçekleşir. Küçük kriyosoğutucular ise, genellikle %1 ila %10 arası Carnot verimi ile çalışır (Mohammed, 2008), (Zhao ve Wang, 2019).

Kriyosoğutucular, çalışma maddesi olarak kriyojenik bir akışkan (kriyojen) kullanır ve bu akışkanın görevi, cihazın içindeki ısıyı emerek bir döngü çerçevesinde dışarı atmaktır. Kriyosoğutuculardaki soğutma döngüleri, tipik olarak bir kompresörde sıkıştırılan bir gazla başlar. Sıkıştırılmış olan gaz, bir ısı eşanjöründen geçerken, kriyosoğutucunun içindeki ısıyı emer ve böylece kriyosoğutucu içindeki her şeyi soğutur. Aynı gaz, ısı eşanjöründe, sabit bir hacimde ısıyı emdiğinde basıncı artar. Döngünün sonraki kısmında, hacim olarak genişler ve basıncı düşer. Son olarak, süreç boyunca, kapalı bir döngüyü tamamlar ve ardından tekrar dolaşıma geçerek kompresöre geri döner (Zhao ve Wang, 2019).

3.2 Kriyojenik Soğutucuların Sınıflandırılması



Şekil 3.1. Kriyosoğutma teknikleri sınıflandırılması [Atrey, 2020 – referans alınarak ve revize edilerek oluşturulmuştur].

I. Çevrimlerine göre kriyosoğutucular;

Kriyosoğutucular, sahip olduğu çevrimin yapısına göre açık çevrimli kriyosoğutucular ve kapalı çevrimli kriyosoğutucular olarak ikiye grupta incelenir (Atrey, 2020).

Açık çevrim sistemlerde kriyojenik soğutma, yüksek basınçta depolanan ve ortam sıcaklığında tutulan gaz ile açık çevrime sahip bir kriyosoğutucu kullanılarak gerçekleştirilir. Depolanan gaz, genleşmeden sonra atmosfere salınır. Ancak çoğu uygulama, kriyojenik sıcaklıkları korumak için, sıvı nitrojen (LN₂) ve sıvı helyum (LHe) gibi depolanabilen kriyojenleri kullanır. Depolanan bu kriyojenlerin düzenli aralıklarla yenilenmesi gerekir. Uygulama gereksinimlerine göre kriyojenler; katı,

sıvı veya süper kritik fazda olabilirler. Bununla birlikte, depolanmış kriyojenleri elde etmek için, sıvılaştırma sürecinde, farklı soğutma döngülerinin de yer alabileceği büyük ölçekli soğutma tesisleri kullanılabilir (Atrey, 2020).

Madde, belirli bir sıcaklık ve basınç değerlerinin (kritik sıcaklık ve basınç: kritik nokta) üstünde süperkritik akışkan fazını almaktadır. Süperkritik akışkan fazı, ne gaz ne de sıvı haldedir, ancak söz edilen her iki fazın özelliklerini de barındırır. Süperkritik akışkanın yoğunluğu, gaz formunda bulunan akışkanın yoğunluğundan 200 ila 400 kat daha fazladır. Bu sebepten ötürü; süperkritik akışkanlar, büyük ve uçucu olmayan molekülleri çözme hususunda çok yeteneklidirler. Ayrıca süperkritik akışkanlar, düşük viskozite ve yüksek difüzyon katsayılarına sahip oldukları için sıvı çözücülere oranla, daha yüksek miktarda kütle transferi yapabilme özelliği sergilemektedirler (Saka, 2019).

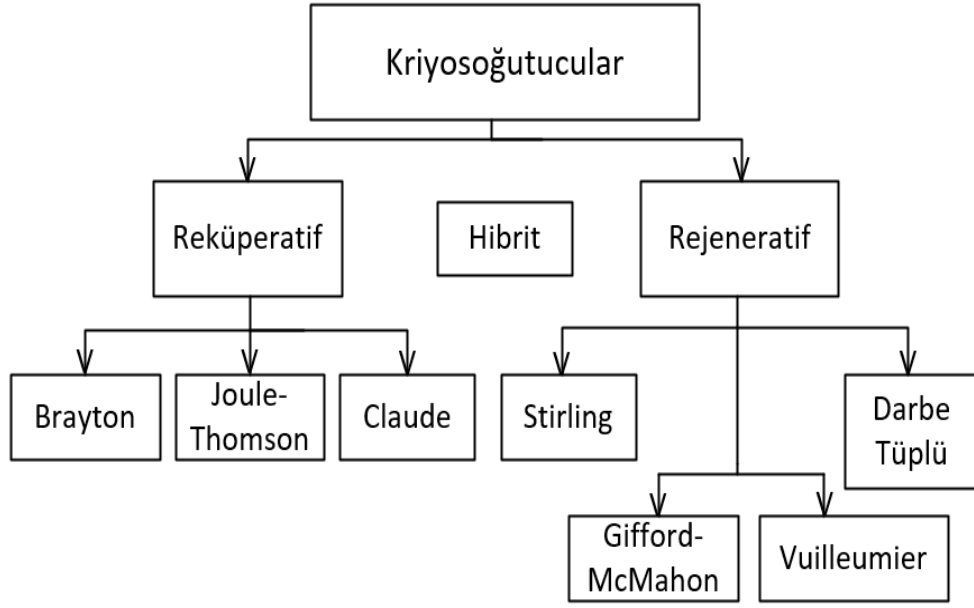
II. Kapalı döngüye sahip kriyosoğutucular, hareketli aksam bulunup bulundurmamalarına göre;

Kapalı çevrime sahip kriyosoğutucular, genel olarak dinamik ve statik olarak iki farklı kategoriye indirgenebilirler. Statik kriyosoğutucular hareketli parçalara sahip olmayan kriyosoğutuculardır. Statik kriyosoğutucu tipleri şöyledir; sorpsiyonlu, radyatörlü, manyetik ve lazerli kriyosoğutuculardır (Atrey, 2020).

Dünyada kullanılan kriyosoğutucuların %2'sinden azına tekabül eden statik kriyosoğutucuların yanında, kalan büyük kısmı oluşturan ve tez kapsamında inceleyeceğimiz kriyosoğutucular ise dinamik kriyosoğutuculardır (Atrey, 2020).

III. Isı eşanjörlerine göre kriyosoğutucular;

Dinamik kriyosoğutucular, ısı eşanjörlerinin ısı değişimine bağlı olarak, reküperatif ve rejeneratif kriyosoğutucular olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Bu ayrımı, elektrik ile analogi yaparak ifade edecek olursak; rejeneratörleri alternatif akış (AC sistemi) ve reküperatörleri de sürekli bir akış (DC sistemi) olarak tarif etmek yerinde olur (Zhao ve Wang, 2019). Reküperatif kriyosoğutucular; Joule-Thomson, Brayton, Claude, Collins, Linde ve Hampson kriyosoğutucular iken, rejeneratif kriyosoğutucular; Stirling, Gifford-McMahon, Vuilleumier, darbe tüplü, Ericsson ve Solvay kriyosoğutuculardır. Günümüzde bu tasnifin dışında kalan, hibrit tip kriyosoğutucu modelleri de söz konusudur (Zhao ve Wang, 2019), (Atrey, 2020).



Şekil 3.2. Kriyosoğutucuların eşanjör tipine göre sınıflandırılması [Atrey, 2020 – referans alınarak ve revize edilerek oluşturulmuştur].

IV. Soğutma sıcaklıklarına göre kriyosoğutucular;

Bilinen kriyosoğutucuların hiçbiri, tüm kriyojenik sıcaklık aralıklarında etkili bir şekilde çalışmaz. Helyum (4 K), hidrojen (20 K), nitrojen (80 K) ve metan (120 K) normal basınçtaki sıvılaştırma sıcaklıklarının yaklaşık değerleri göz önüne alınarak bir soğutma sıcaklığı sınıflandırması yapılabilir. Soğutma sıcaklıklarına göre kriyosoğutucular, referans olması açısından, bu dört sıcaklığa yapılan ilaveyle, şu beş sıcaklık baz alınarak bir gruplandırma yapmak önerilmektedir; 1 K, 4 K, 20 K, 80 K ve 120 K. (Walker, 1983).

V. Soğutma kapasitelerine göre kriyosoğutucular;

Soğutma sıcaklığına göre sınıflandırma ile çok ilintili olan bir başka sınıflandırma ölçütü ise, kriyosoğutucuların soğutma kapasitelerine göre sınıflandırılmasıdır. Soğutma kapasitesine göre kriyosoğutucular için önerilen sınıflandırma: mikrominyatür (mikro), minyatür, küçük, orta ve büyük kriyosoğutucular şeklindedir (Walker, 1983). Bu sınıflandırma aynı zamanda, kriyosoğutucuları büyüklüklerine göre de ayırmaktadır. Tablo 3.2’de soğutma kapasitelerine göre kriyosoğutucular detaylandırılmaktadır.

Tablo 3.2. Soğutma kapasitelerine göre kriyosoğutucular [Walker, 1983].

Soğutma Kapasitelerine Göre Kriyosoğutucular					
İsimlendirme ve Kullanım Yerleri	Sıcaklıklar				
	1 K	4 K	20 K	80 K	120 K
Mikrominyatür kriyosoğutucular (çok düşük kapasiteli elektronik uygulamalar)	—	—	<0.25 W	<1 W	<1.5 W
Minyatür kriyosoğutucular (düşük kapasiteli elektronik ve enstrüman uygulamaları)	—	<0.5 W	<2 W	<8 W	<12 W
Küçük kriyosoğutucular (genel amaçlı laboratuvar ve ticari sistemler)	<1 W	<10 W	<100 W	<0.8 kW	<1.2 kW
Orta kriyosoğutucular (küçük ölçekli gaz sıvılaştırma ve endüstriyel süperiletken sistemler)	<25 W	<100 W	<1 kW	<15 kW	<25 kW
Büyük kriyosoğutucular (büyük ölçekli gaz sıvılaştırma sistemleri, LNG üretimi, tonaj oksijen, helyum geri kazanımı vb.)	>25 W	>100 W	>1 kW	>15 kW	>25 kW

3.2.1 Reküperatif Kriyosoğutucular

Reküperatif kriyosoğutucu olarak nitelendirdiğimiz kriyosoğutucular, “karşı akışlı ısıtıcı eşanjörü” olarak da adlandırılan bir geri kazanımlı (reküperatif) ısı eşanjörü ve sistem boyunca karşı akışlı gaz veya sıvı akışı ile çalışan kriyosoğutuculardır (Zhao ve Wang, 2019). Aşağıda Fotoğraf 3.1 ve Fotoğraf 3.2’de, örnek reküperatörler gösterilmektedir.



Fotoğraf 3.1. Reküperatif ısı eşanjörü (reküperatör).



Fotoğraf 3.2. WTP Rekuperatif ısı eşanjörü (rekuperatör) [<https://lob-gmbh.de/en/produkt/wtp-gas-gas-recuperator>].

Rekuperatif ısı eşanjörleri, akışların sürekli olarak ısı alışverişinde olduğu iki akış geçişine sahiptirler. Bu akış geçişleri, katı bir arayüz aracılığıyla sağlanır. Akışkanlar, birbirine karışmazlar. Kompresör, sabit bir giriş ve çıkış basıncı ile çalışır. Kompresörün ileri geri hareket ettiği modellerde ise, sabit akışı sağlamak için giriş ve çıkış valflerine (valfli kompresör) sahip olması gerekir. Kaydırmalı, vidalı veya santrifüj kompresörlerin sabit akışı sağlamak için vanalara ihtiyacı yoktur. Rekuperatif kriyosoğutucular, hareketli parçalar bulundurmamaları ile bakım ve ömür açısından verimli sistemlerdir (Can, 2018).

Rekuperatif eşanjörlerin veya kısaca rekuperatörlerin üretim maliyeti rejeneratif eşanjörlere veya diğer bir deyişle rejeneratörlere nispetle daha pahalıdır. Çoğu rekuperatif kriyosoğutucu için gerekli olan yüksek basınç oranları, sıkıştırma işleminin verimlilik oranını yaklaşık olarak yarı yarıya sınırlar ve bu durum da rekuperatif kriyosoğutucuların genel verimliliğini önemli ölçüde düşük seviyeye mahkûm eder (Kakaç, 2003). Rekuperatif kriyosoğutucular, akışkanın bir yönde ve sabit olarak akması bakımından bir elektrikli cihaza benzer özellik taşırlar. Ayrıca çeşitli yerleri noktasal soğutmak için soğutucuyu oldukça geniş mesafelere taşıyabilirler (Atrey, 2020).

Rekuperatif olan kriyosoğutucuların en yaygın kullanılan ticari tipleri: Joule-Thomson, Brayton ve Claude kriyosoğutucular şeklinde sınıflandırılabilir. Bunların içinde de en yaygın olarak kullanılan rekuperatif kriyosoğutucu tipi, J-T kriyosoğutuculardır (Atrey, 2020).

3.2.1.1 Joule-Thomson (J-T) Kriyosoğutucular



Fotoğraf 3.3. Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu [Ross, 2016].

- J-T etkisi

Joule-Thomson etkisi, pek çok soğutucu mekanizmanın temel çalışma elemanıdır. J-T etkisi soğutucu mekanizmalarda hızla genleşen gazlar için kullanılmaktadır. Bir gazın izentalpik genişlemesine ilişkin ilk deneyler, 1850'lerin başında Manchester, İngiltere'de İngiliz fizikçi James Prescott Joule ve İskoçyalı fizikçi William Thomson (daha sonra Lord Kelvin olacak) tarafından gerçekleştirildi. İlk deneyler, bir memeden geçen gaz (izentropik genleşme) ile yapılmıştır. Daha sonraki deneylerde gözenekli bir tıkaç, nozülün yerini aldı ve Joule ile Thomson, farklı gazlarla izentalpik genişlemeyi araştırdı. Joule (1852), ortam sıcaklığına yakın başlangıç sıcaklıklarında, birçok gazın (hava, CO₂, O₂, N₂) sıcaklıkta bir düşüş yaşadığını ancak hidrojenin sıcaklıkta bir artış yaşadığını tespit etti. Bu deneyin sonucu anlaşılan durum Joule-Thomson etkisi olarak tanımlandı (Walker, 1983), (Kakaç, 2003).

- J-T Kriyosoğutucular

Joule-Thomson etkisinin kriyosoğutmada uygulanabileceği yakın zamanlarda Almanya'da Carl von Linde (1897) ve İngiltere'de William Hampson (1895) tarafından birbirlerinden bağımsız olarak tasarlanan hava sıvılaştırıcıları ile ortaya konumuştur. Linde ve Hampson tarafından keşfedilen hava sıvılaştırıcılarla birlikte, Joule-Thomson kriyosoğutucuların ortaya çıkışı için uygun zemin oluşmuştur. Joule-Thomson kriyosoğutucular, Linde-Hampson kriyosoğutucuların basit bir hali olarak görülebilir. J-T kriyosoğutucular, ön soğutmalı Linde-Hampson kriyosoğutucu olarak da nitelendirilebilir (Walker, 1983). Fotoğraf 3.3'te bir J-T kriyosoğutucu gösterilmektedir.

Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucular, en yaygın olarak kullanılan reküperatif kriyosoğutucu tipidir. J-T kriyosoğutucular, gerçek gazlardaki Joule-Thomson etkisinden faydalanarak çalışırlar ve açık veya kapalı bir döngü çerçevesinde kriyosoğutma yapmak için dizayn edilmiş cihazlardır. J-T kriyosoğutucular, kriyosoğutucuların veya çoğu sıvılaştırma döngüsünün son aşaması olarak yaygın olarak uygulanan en basit kriyosoğutucu türüdür. Joule-Thomson kriyosoğutucular, genellikle hızlı kriyojenik soğutma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen kriyosoğutuculardır (Atrey, 2020).

Joule-Thomson etkisinin kimyasal boyutunu ifade etmek gerekirse, gazlar genleştiklerinde moleküller birbirlerinden ayrılarak ortalama hızları düşmektedir. Moleküller arası çekim kuvvetini yenmek için gaz moleküllerinin öz ısıları kullanılmaktadır. Dolayısıyla genleştirilen gazlar hızlıca soğur. Böylece bulunduğu ortamı da soğuturlar. Bu genleşme sıcaklık değişimi ne kadar az ise gaz ideale o kadar yakındır. Bir başka ifadeyle Joule-Thomson (J-T) etkisi, sabit entalpi koşulları altında yüksek basınçtan düşük basınca geçerek genişleme sonucu oluşan bir sıvının soğumasıdır (Atrey, 2020).

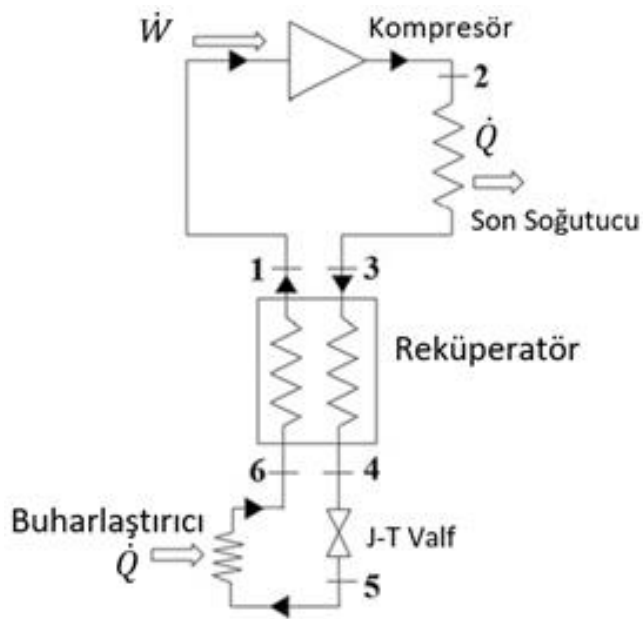
İlk Joule-Thomson kriyosoğutucuların çoğu, nitrojen için normal kaynama noktası olan yaklaşık 77 K'lık bir sıcaklığa ulaşmak amacıyla nitrojen gibi saf bir sıvıyı kullandılar. Oda sıcaklığında sıkıştırma işlemi, 126 K kritik nitrojen sıcaklığının çok üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleşiyordu. Bu koşullar altında, 20 MPa kadar yüksek bir basınçta bile genleşme üzerine sıcaklık düşüşü sadece 25 K civarındadır. Bu nedenle, kriyojenik sıcaklıklara ulaşmak için çok verimli bir reküperatif ısı eşanjörü gereklidir. İlerleyen süreçte buradan hareketle, J-T kriyosoğutucularda performansı artırmak için saf sıvılar, öncelikle nitrojen, metan,

etan ve propan gibi karışık gazlarla değiştirildi ve ardından basıncın yüksek olduğu taraftaki basınç istenilen seviyelere kadar düşürüldü (Kakaç, 2003).

Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucular, buhar sıkıştırırmalı soğutuculara çok benzerler, ancak ana ısı eşanjörü, buhar sıkıştırırmalı buzdolaplarında neredeyse yoktur çünkü sıcaklık aralığı çok düşük değerdedir. Buhar sıkıştırırmalı soğutucularda sıkıştırma, soğutucunun kritik sıcaklığının altında gerçekleşir. Sonuç olarak, son soğutucuda oda sıcaklığında sıvılaşma meydana gelir (Atrey, 2020).

J-T kriyosoğutucular, 75 ila 120 K sıcaklıklara ulaşmak için açık veya kapalı çevrimde tasarlanmış kriyosoğutuculardır. J-T çevrimlerinde, genleşme ısı girdisi veya iş üretimi olmadan gerçekleşir; bu nedenle, süreç sabit bir entalpide gerçekleşir. Gazın genleşmesi, yalnızca çalışma sıvısının başlangıç sıcaklığı, inversiyon sıcaklığı olarak adlandırılan karakteristik sıcaklığın altındaysa, sıcaklığın düşmesine neden olur. Farklı çalışma sıvıları kullanarak, çok farklı düzeyde sıcaklıklarda soğutma işlemleri gerçekleştirilebilir (Atrey, 2020)

J-T kriyosoğutucular, bir başka tarifle, soğutucuya yüksek bir basınçta giren ve onu daha düşük bir basınçta bırakan sürekli bir çalışma sıvısı akışı ile çalışır. Bu akış sırasında entalpi sabittir ve sıcaklık düşer. İdeal olarak, giden sıvının sıcaklığı, giren sıvının sıcaklığına eşittir. Bu sebepten ötürü yüksek basınç oranlı kompresörler kullanılmaktadır (Atrey, 2020).



Şekil 3.3. Kapalı döngü bir Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu döngüsel şeması [Atrey, 2020].

Şekil 3.3'te gösterilen döngüyü, aşağıdaki gibi altı adımda ifade edebiliriz:

1. Kompresör ile iş akışkanı 20 MPa veya daha yüksek bir basınca sıkıştırılır.
2. Yüksek basınçlı akış, son soğutucu tarafından ortam sıcaklığına soğutulur.
3. Sonrasında yüksek basınçlı akış, reküperatörden geçer ve burada yüksek basınçlı akış, J-T genişlemesinden önce buharlaştırıcıdan dönen düşük basınçlı, düşük sıcaklıklı gaz akışı aracılığıyla soğutulur.
4. Yüksek basınçlı sıvı, daha sonra J-T valfinde izentalpik genişlemeye uğrar, ardında soğur ve fazı kısmen sıvıya çevrilir.
5. Genleşen sıvı, buharlaştırıcıdaki sabit sıcaklıktaki ısıyı emer.
6. Sonrasında sıvı, çevrimi tamamlamak için ısı eşanjörü aracılığıyla kompresöre geri döner.

J-T kriyosoğutucular, kolaylıkla minyatürleştirilebilme özelliğine olan kriyosoğutuculardır. Aynı zamanda J-T kriyosoğutucular, J-T genleşme işlemi ile doğal gazın sıvılaştırılması ve hatta diğer gazların çok büyük ölçekli sıvılaştırılma uygulamalarında bile yaygın kullanıma sahip kriyosoğutuculardır (Atrey, 2020). Aşağıda Fotoğraf 3.4'te, minyatür bir J-T kriyosoğutucu gösterilmektedir.



Fotoğraf 3.4. Minyatür Joule-Thomson (J-T) kriyosoğutucu [Radebaugh and Ross, 2015].

Öncelikle J-T kriyosoğutucunun tercih edileceği bazı alanlar aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Kriyocerrahi uygulamaları
- Radyo teleskopları için düşük gürültülü amplifikatörlerde
- Uzayda kızılötesi dedektörlerin ve yüksek elektron hareketli transistör tabanlı cihazların soğutulması.

- Klimenko (Karışık Gaz Akışlı J-T) Kriyosoğutucular

1959 yılında, A. P. Klimenko, doğal gaz sıvılaştırma işlemi için, tek kompresörlü kaskad (karışık soğutkan) çevrimini geliştirmiştir. Bu keşifle birlikte, tek gaz yerine kullanan J-T kriyosoğutuculara alternatif olarak, gaz karışımı kullanan J-T kriyosoğutucular geliştirildi (Boiarski ve ark., 1998). Bu karışık gazlı J-T kriyosoğutucular, akademik literatürde Klimenko (Kleemenko) kriyosoğutucular olarak da isimlendirilebilirler. Sıkıştırılmış bir karışım, karşı akışlı bir eşanjörden geçer ve bir klape boyunca genişler, soğutulmuş gaz sürekli bir işlem sonucu, eşanjörden geri döner (Klimenko, 1959). Karışık gazların kullanımı, iki karşı akışlı gaz akışının ısı kapasitelerini "eşit hale getirmek" ve böylece değişim sürecini çok daha verimli hale getirmek için tasarlanmıştır. Ancak genleşen sıvı, bir sıvı ve gaz bir karışımıdır; bu nedenle genleşen sıvının, buharı önceden soğutmasını sağlamak için bir sıvı-buhar ayırıcıya ihtiyaç vardır (Ventura ve Risegari, 2007).

Yaklaşık 80 K'e kadar kullanılan sıvı karışımları, kabaca eşit metan, etan ve propan ile nitrojen içerir. Giriş basınçları, yaklaşık 10 MPa'dır. Genel verimlilik düzeyleri, tek sıvı Joule–Thomson sistemlerinden çok daha fazladır. Ayrıca GM ve Stirling çevrimleriyle de karşılaştırılabilir düzeydedir (Ventura ve Risegari, 2007).

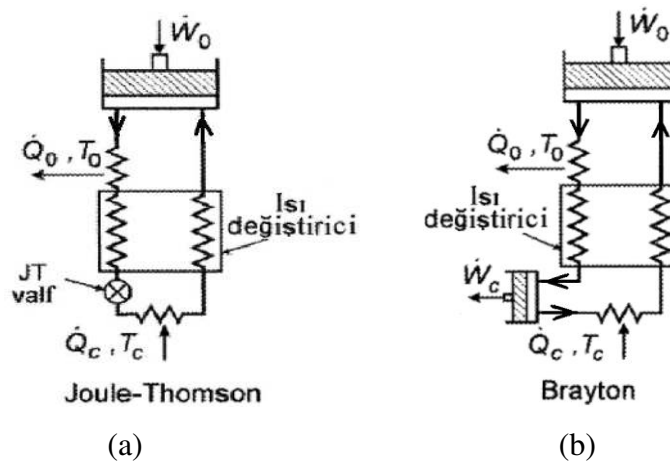
3.2.1.2 Brayton Kriyosoğutucular



Fotoğraf 3.5. Turbo-Brayton kriyosoğutucu

[<https://www.openpr.com/news/1083585/global-turbo-brayton-cryocoolers-market-forecast-2018-2025-sunpower-brooks-automation-chart-industries-dh-industries.html>].

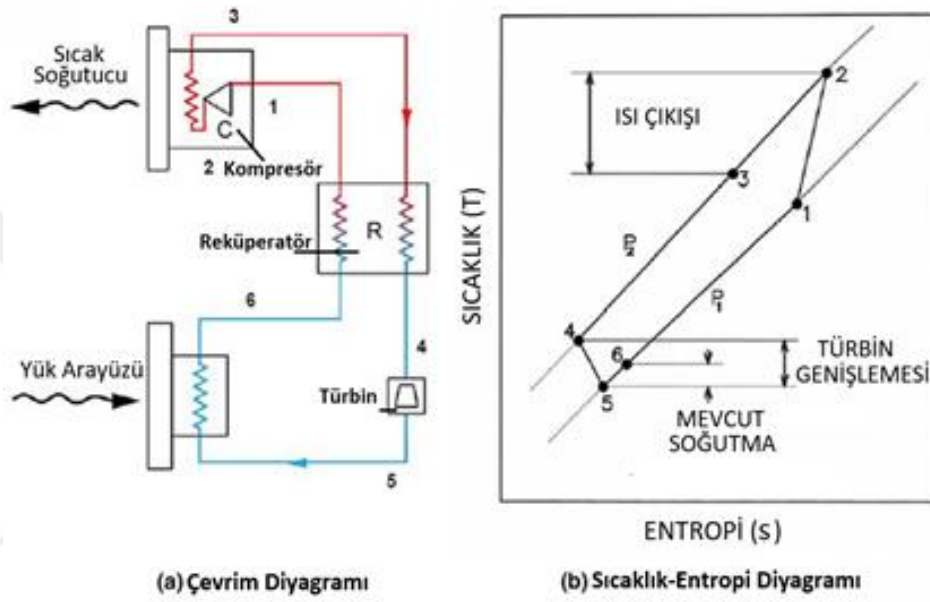
Brayton kriyosoğutucular, sürekli ters akışlı bir ısı eşanjörü kullanan ve ters-Brayton çevrimi çerçevesinde çalışan kriyosoğutuculardır. Brayton çevrimi, ters yönde uygulanarak soğutma amaçlı kullanıma uygun hale getirilmiştir. Ters-Brayton çevrimi, Joule-Thomson ve Claude çevrimlerine benzer yapıda bir çevrimdir (Radebaugh, 1997). Turbo-Brayton kriyosoğutucularda, genellikle çevrim gazı olarak 35 K altı sıcaklıklarda soğutma yapmak için neon kullanılıyorken, 35 K altı sıcaklıklarda soğutma yapmak için de helyum kullanılmaktadır (Radebaugh, 2020). Brayton kriyosoğutucular, çevrim gazını sıkıştırmak maksadıyla bünyelerinde bir kompresör bulundururlar (Kakaç, 2003), (Ventura ve Risegari, 2007). Yukarıda Fotoğraf 3.5’te, bir turbo-Brayton kriyosoğutucu gösterilmektedir.



Şekil 3.4. (a) J-T kriyosoğutucu şeması, (b) Brayton kriyosoğutucu şeması

[Radebaugh, 1999-2000].

Brayton çevrimi, Joule-Thomson çevrimine benzemekle beraber, ondan farklı olarak, gaz genişlemesi için Şekil 3.4(a)'da gösterildiği gibi bir Joule-Thomson valfi bulundurmak yerine, Şekil 3.4(b)'de gösterildiği gibi bir türbin bulundurmaktadır. Gazın, Şekil 3.4(b)'de gösterildiği gibi, tersinir bir genişleme gerçekleştirmek için genişleme motorunu kullanması, Joule-Thomson kriyosoğutucularla elde edilmesi mümkün olan soğutmadan daha yüksek performanslı bir soğutma elde edilmesine olanak sağlar.



Şekil 3.5. Brayton kriyosoğutucu döngü şeması (a) ve (b) [Zagarola ve ark., 2006)].

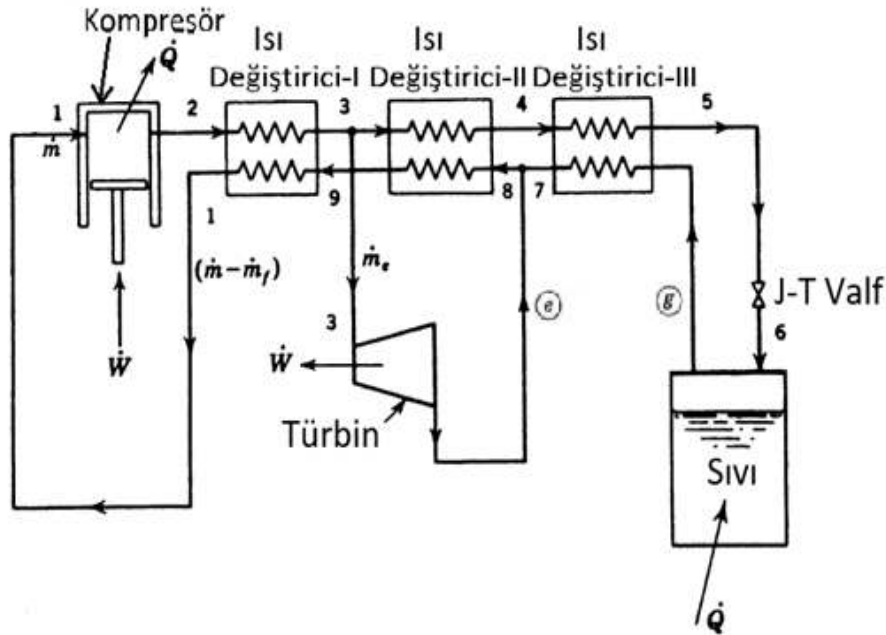
Şekil 3.5'te, Brayton kriyosoğutuculara ait bir çevrim şeması ve T-s grafiği verilmiştir. Ters-Brayton çevriminde gerçekleşen aşamalar şöyledir:

- Gaz önce sıkıştırılır.
- Gaz sıkıştırmayı reddeder ve ısıyı çevreye atmak için sıcak bir ısı eşanjöründen geçirilir.
- Gazın sıcaklığını yükün sıcaklığına yakın bir seviyeye düşürmek için, gaz ters akışlı bir ısı eşanjöründen geçer.
- Gazın bir genişletiricide basıncı düşürülür ve gaz soğutulur.
- Daha sonra gaz, soğuk ısı eşanjöründeki yükten ısıyı emer.
- Son olarak gaz, karşı akışlı ısı eşanjörüyle, geriye doğru döndürülür ve kompresöre geri döner. Böylece çevrim tamamlanmış olur (Hall ve Barclay, 1998).

3.2.1.3 Claude Kriyosoğutucular

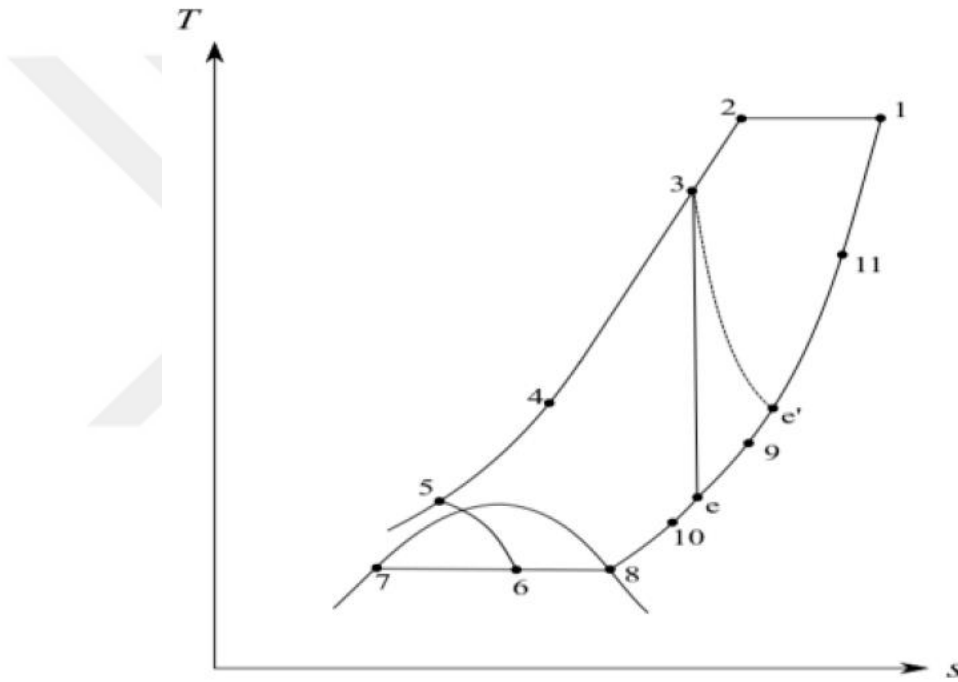
Claude kriyosoğutucular, ön soğutma için bir genişleme motorunun kullanıldığı, Claude çevrimini kullanarak soğutma sağlayan kriyosoğutuculardır. Claude çevrimi, J-T ve Brayton döngülerinin karması yapıda olan bir çevrim olarak tarif edilebilir. Claude çevrimi diğer bir ifadeyle, bir genişleme motorunun, Linde-Hampson çevrimine eklenmesi ve reküperatif eşanjörün getirdiği ek aşamayla beraber sistem oluşturulan bir çevrim şeklinde de ifade edilebilir. Claude çevriminden J-T genişlemesi çıkartılırsa, geriye kalan çevrim, Joule-Brayton çevrimidir (Walker, 1983). Claude çevrimi, öncelikle sıvının, genişleme motorlarına veya türbinlere zarar verebileceği gaz sıvılaştırma işlemlerinde için kullanılmaktadır (Kakaç, 2003).

Kriyojenik soğutma amaçlı kullanılan Claude çevrimi, yaygın olarak sıvılaştırma amaçlı kullanıma da sahiptir. Claude çevrimi, helyum ve hidrojen de dahil olmak üzere, gazları sıvılaştırmak için kullanılan çok yaygın bir sıvılaştırma çevrimidir. Bir gazın sıvılaştırılması için gazın sıcaklığı, kritik sıcaklığın altında olmalıdır. Claude çevriminde soğutma etkisi, Joule-Thompson valfi ve türbin tarafından üretilmektedir (Çetin ve Kanoğlu, 2017). Aşağıda Şekil 3.6'da, bir Claude kriyosoğutma çevrimi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Claude kriyosoğutucu döngüsel şema [Barron, R. F. (2013). *Cryogenic Systems: Second Edition*. McGraw Hill, Oxford University Press, New York, USA, 506].

Claude çevriminin düşük sıcaklıklı kısmı, J-T çevrimine benzemektedir ve Claude çevriminin J-T aşamasını oluşturmaktadır. Claude çevriminin diğer üstte kalan kısmı ise, Brayton çevrimine benzemektedir. Her iki kısım da bir kompresör tarafından çalıştırılır. Çevrimin Brayton kısmı, burada bir tür ön soğutma çevrimi olarak kullanılır. Girişteki sıcaklığı, Joule-Thomson kısmı için düşürmek gerekir. Kompresör basıncı, genellikle klasik bir Joule-Thomson döngüsünden biraz daha düşüktür, ancak klasik Brayton çevriminden daha yüksektir (Walker, 1983). Aşağıda Şekil 3.7’de, Claude kriyosoğutma çevrimine ait bir T-s diyagramı yer almaktadır.



Şekil 3.7. Claude çevrimi T-s diyagramı [<https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/MIT-Cryo-Eng.shtml>].

Claude çevrim soğutma sistemlerinde, genişleme motorunun çoklu aşamaları kullanılır. Birkaç ayrı motorda, çeşitli genişlemeler meydana gelebilir veya art arda daha küçük çaplara sahip uzun bir piston ve bu pistonu uyacak uygun çaplara sahip uzun bir silindirde çalışabilir. Bu ikinci tandem bileşik düzenlemesi, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Collins tarafından, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilen üç veya dört aşamalı Claude döngüsünde çalışan helyum, sıvılaştırma motorlarında kullanılmıştır (Walker, 1983).

3.2.2 Rejeneratif Kriyosoğutucular

Rejeneratif kriyosoğutucular ısı geçişinin doğrudan gerçekleşmediği ve ısının rejeneratif ısı eşanjörü ile depolandığı, salınımlı akış ve basınçla çalışan kriyosoğutuculardır.



Fotoğraf 3.6. Rejeneratif ısı eşanjörü (rejeneratör)

[https://wwwi.globalpiyasa.com/lib/Urun/670/f3cea6b77b2c9ff3790fcf63f3a02f9c_1.jpg].

Rejeneratif kriyosoğutucu veya kısaca rejeneratör gelen sıcak gazdaki ısıyı bünyesindeki gözenekli yapıdaki dolgu maddesi olan matris aracılığı ile yarım döngü için depolar. Matris, döner veya sabit yapıda olabilir. Yani burada ısının doğrudan katı bir arayüz ile transferi söz konusu değildir. Döngünün ikinci yarısında, aynı kanaldan ters yönde akan ve geri dönen soğuk gaz, matristen ısıyı alır ve böylece döngü tekrarlanmadan önce matrisi orijinal sıcaklığına geri döndürür. Isı matris üzerinden yani dolaylı olarak akışkana aktarılmış olur. Denge durumunda rejeneratörün bir ucu oda sıcaklığında, diğer ucu ise soğuk vaziyettedir. Rejeneratörlerde, gelişmiş ısı transferi için gerekli yüksek düzeyde yüzey alanı, istiflenmiş ince gözenekli elek veya paketlenmiş küreler kullanılarak kolayca elde edilir (Atrey, 2020).

Rejeneratif olan kriyosoğutucuların en yaygın olarak kullanılan tipleri: Stirling, Gifford-McMahon, Vuilleumier ve darbe tüplü kriyosoğutucular şeklinde sınıflandırılabilir (Atrey, 2020).

3.2.2.1 Stirling Kriyosoğutucular

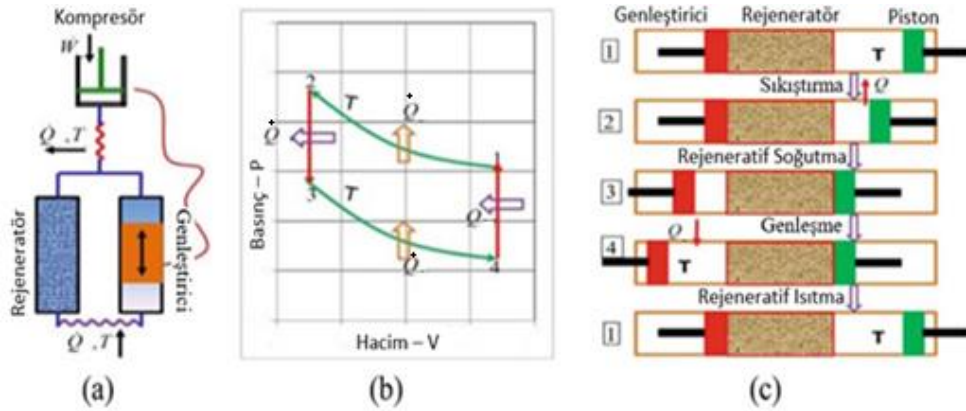
Stirling kriyosoğutucular, ortaya çıkan ilk kriyosoğutucu tipidir ve kriyosoğutucu tipleri arasında en verimli olanlarından biri olmasının yanı sıra en yaygın kullanıma sahip kriyosoğutucu tipidir. Diğer tüm rejeneratif tip kriyosoğutucular, Stirling kriyosoğutucuların bir modifikasyonu olarak düşünülebilir. Stirling kriyosoğutucular, akıştaki bir kriyojenin, iki sabit hacimli işlem ve iki izotermal işlemden oluşan bir ters Stirling döngüsüne girmesi sağlanarak soğutma elde etme prensibi ile çalışır. Cihazlar, bir kompresör pompası ve 'rejeneratör' olarak bilinen rejeneratif ısı eşanjörüne sahip bir yerdeğiştirme ünitesinden oluşur (Atrey, 2020).



Fotoğraf 3.7. Stirling kriyosoğutucu [Perinić ve ark., 2005].

1815 yılında, Robert Stirling, Stirling döngüsünü geliştirdi. 1946 yılında, Stirling döngüsünün soğutma amacıyla kullanılabileceği keşfedildi. Yani Stirling döngüsünün ters yönlü uygulanarak (ters Stirling döngüsü) kullanılmasıyla birlikte, soğuk uçtaki havayı sıvılaştırdığı keşfedilmiş oldu (Kakaç, 2003). Bunun üzerine Stirling kriyosoğutucuların ilk örneği, 1954 yılında Hollanda'daki Philips Şirketi'nde, Jan Köhler önderliğinde bir grup çalışan tarafından başlatılan çalışmayla birlikte, iki yıl gibi bir süre sonra yani 1956 yılında, ilk ticari Stirling kriyosoğutucu ortaya çıktı. Bu ilk ortaya çıkan Stirling kriyosoğutucularda amaç,

hava ve hidrojenin sıvılaştırılmasıydı. Philips Şirketi aldığı kararla kriyosoğutucularda, çalışma sıvısı olarak helyumun kullanılmasının daha iyi performans sağlayacağı sonucuna vararak, Stirling kriyosoğutucularda öncelikli teci olarak helyumu kullanmaya başladı (Kakaç, 2003). 1960'larda, minyatür Stirling kriyosoğutucular, haberleşme amaçlı kızılötesi (IR) sensörlerin soğutma cihazları olarak kullanılmaya başlandı. Bu uygulamalar için gerekli soğutma etkisi 80 K için 1 ila 2 W civarındaydı. Bu öncü kriyosoğutucular, krank tahrikli ve sürtünen piston halkalı, döner tipte kriyosoğutuculardı ve ömürleri sadece birkaç yüz saatti. Ancak temas noktaları için geliştirilen malzemelerle birlikte, bir yıllık ömre ulaşır hale geldiler. Ayrıca, 1970'lerde, sürtünme kaynaklı temasın çoğunu ortadan kaldıran ve gelişimlerinin erken dönemleri için daha uzun kullanım ömrü sunan doğrusal tahrikli Stirling kriyosoğutucular da piyasaya sunuldu. Şu anda, kullanım ömürleri ise yaklaşık olarak bir ila üç yıldır. 1998 yılına gelindiğinde, gece görüş ekipmanlarında kullanılmak üzere 140.000'den fazla minyatür Stirling kriyosoğutucusu üretilmişti ve bu kriyosoğutucular için gerekli soğutma güçleri 80 K'de yaklaşık olarak 0.15 ila 1.75 W'dır (Ventura ve Risegari, 2007), (Atrey, 2020), (Radebaugh, 2020).



Şekil 3.8. (a) Stirling kriyosoğutucu çevrim şeması, (b) Stirling çevrim P-V diyagramı, (c) Stirling kriyosoğutucunun çalışma prensibi [Atrey, 2020].

Stirling kriyosoğutucu için ideal bir çevrim yukarıda Şekil 3.8'te gösterildiği gibidir.

İdeal bir Stirling çevrimi dört işlemden oluşur (Atrey, 2020):

- I. (1-2) aralığında T_c 'de izotermal sıkıştırma,
- II. (2-3) aralığında rejeneratör matrisine izokorik ısı çıkışı,

III. (3-4) aralığında izotermal genleşme ve

IV. (4-1) aralığında rejeneratör matrisinden izokorik ısı emilimi.

Stirling kriyosoğutucularda çevrim olarak ters bir Stirling çevrimi kullanılırken, çevrim elemanları ise bir kompresör, bir rejeneratör ve bir soğuk yerdeğiştiriciden (genleştirciden) oluşur. Tipik olarak kullanılan çalışma sıvısı helyum olmakla birlikte, diğerleri de kullanılabilir.

Döngüdeki dört işlemi detaylı bir şekilde vermek gerekirse çevrim aşağıda belirtilen basamaklar şeklinde döner (Weisend, 2018):

1. Döngüde çalışma sıvısı izotermal olarak sıkıştırılır ve sıkıştırma ısısı oda sıcaklığına çıkarılır.
2. Daha sonra kompresör ve yerdeğiştirici, helyumu, soğuttuğu rejeneratör içinden taşımak için birlikte hareket ederler.
3. Daha sonrasında yerdeğiştirici hareket ederek soğuk vaziyetteki helyumun üzerindeki baskıyı düşürür ve daha fazla soğutma oluşumunu sağlar. Bu süreçte helyum, soğutulan maddedeki ısıyı emer ve sabit bir sıcaklığa sahip olarak kalır.
4. Sonrasında kompresör ve yerdeğiştirici soğuk helyumu rejeneratörden geçirmek maksadıyla birlikte hareket ederler. Burada helyum rejeneratörü soğutur ve sonrasında tekrar başlangıç durumu sıcaklığına ısıtarak döngüyü tamamlar.

Dolayısıyla basınç osilatörü olarak adlandırmak daha doğru olacaktır. Basitçe salınan bir pistondur veya salınımlı bir diyafram olabilir. Helyum, ideal gaz özellikleri, yüksek ısıl iletkenliği ve yüksek özgül ısı oranı nedeniyle rejeneratif döngülerde hemen hemen her zaman çalışma sıvısı olarak kullanılır (Atrey, 2020)



Fotoğraf 3.8. Minyatür Stirling kriyosoğutucu

[<https://advancedtech.airliquide.com/miniature-stirling-cryo-coolers>].

İdeal bir Stirling kriyosoğutucu COP'si (performans katsayısı), bir Carnot COP'sine (performans katsayısına) eşittir ve aşağıda Denklem (1)'de verilmiştir:

$$COP_{Carnot} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_0} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (1)$$

Paydada T_c 'nin oluşumu, genişleme işlemiyle geri kazanılan ve sıkıştırmaya yardımcı olmak için kullanılan P - V gücünden (T_c ile orantılı) kaynaklanır.

Stirling çevrimi bazlı kriyosoğutucularda normalde, çalışma gazında salınımlı bir basınç üreten endüktif elektrik motorları tarafından etkinleştirilen mekanik kompresörler kullanılır. Konvansiyonel kompresörlerin esas dezavantajı, mekanik sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan sınırlı ömürleridir. Aşınma ürünleri ve yağlayıcıların gaz çıkışı çalışma gazını kirletir ve bu nedenle kriyosoğutucu performansını düşürür. Buna ek olarak diğer dezavantajlar ise ısı üretimi, indüklenen titreşimler ve gürültüdür (Sobol & Grossman, 2015).

Son zamanlarda üzerine çalışılan çalışmalardan biri de piezoelektrik eleman bulunduran Stirling kriyosoğutucular üzerinedir. Stirling kriyosoğutucularda piezoelektrik tahrikli bir kompresörün kullanılmasıyla elde edilecek avantaj, mekanik kompresörlere kıyasla aşırı düşük titreşimler ve daha uzun ömür sağlayan pistonların küçük yer değiştirmesidir (Sobol & Grossman, 2015).

Öncelikle Stirling kriyosoğutucunun tercih edileceği bazı alanlar aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Taktiksel ve güvenlik amaçlı kızılötesi sistemler
- Tıbbi ve uzak konum tesisler
- Büyük ölçekli potansiyel HTS uygulamaları.

3.2.2.2 Gifford-McMahon (GM) Kriyosoğutucular



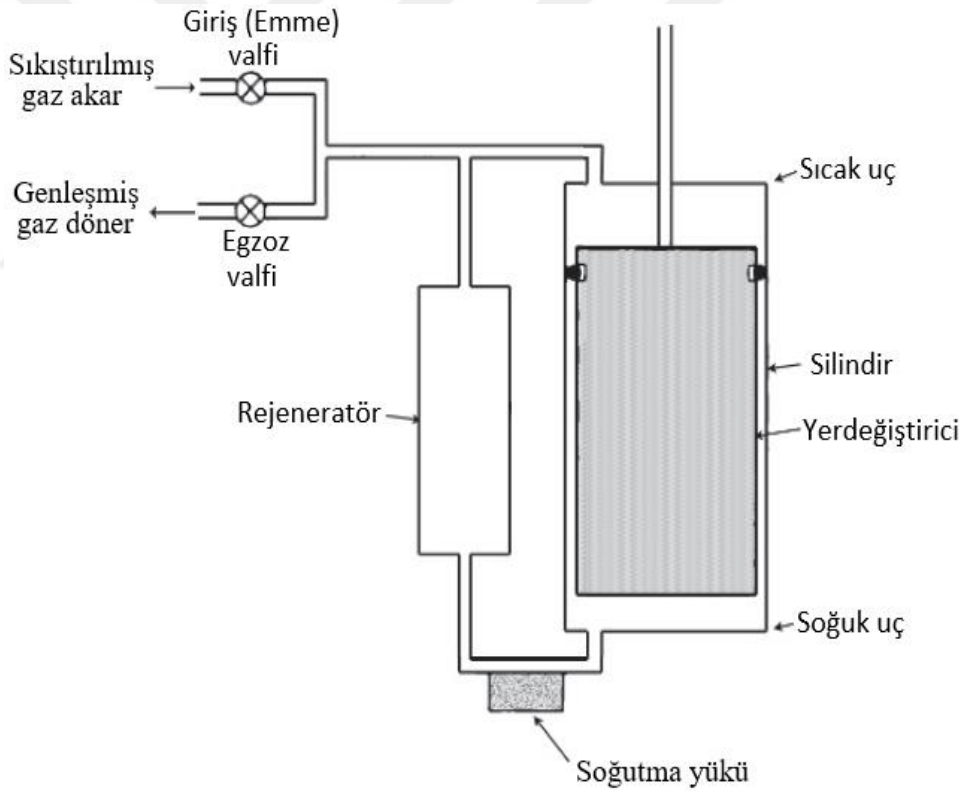
Fotoğraf 3.9. Gifford-McMahon kriyosoğutucu

[<https://en.vacree.com/repository/image/Rvw8urcXS6mZi2X3knIPLA.png>].

Gifford-McMahon (GM) kriyosoğutucular, en yaygın kullanılan kriyosoğutucu tiplerinden biridir. 1960 yılında, William E. Gifford ve Howard O. McMahon, kriyosoğutucular için basınç salınımının, yüksek ve düşük basınç kaynakları arasında geçiş yapan bir döner valf kullanılarak üretilebileceğini gösterdiler. Bunun sonucunda, Gifford-McMahon kriyosoğutucular ortaya çıktı. 1980'lerde, GM kriyosoğutucu tabanlı kriyopompalarda, endüstriyel uygulamalar için ultra temiz vakum sağlamak için ticarileştirildi. Bu soğutucular yaklaşık 15 ila 20 K sıcaklıklara ulaşabiliyordu. 1990'larda, GM kriyosoğutucularda, nadir toprak rejeneratör matris malzemeleri kullanılması üzerine fazla sayıda bilimsel çalışma yapıldı (Gifford ve Longworth, 1964), (Atrey, 2020).

GM kriyosoğutucular esasen Stirling kriyosoğutuculardan türetilmiştir. Buna kanıt olarak da soğuk ucun aynı olması, çevrimin şekli gibi benzerlikler gösterilebilir. Ayırt edici farklılık, kompresör ve genişletici üniteler arasındaki tahrik etmekle görevli olan, genellikle döner tipte valf bulunduran bağlantıdan kaynaklanmaktadır (Weisend, 2018). Bu valfin varlığı, döngüye tersinmezliği

getirir, fakat yerdeğiştiricinin hızının kompresörün hızından ayrılmasına da yol açar. Bu valf, basınçlandırma sırasında, yüksek basınçlı gazın soğuk uca girmesine izin verir. Ayrıca valf, soğuk uçta bir soğutma etkisi oluşturduktan sonra, gazı düşük basınç tarafına bırakır. Valflerin zamanlaması, yer değıştirme hareketini kontrol eder ve dolayısıyla kompresörün, pistondan daha düşük bir frekansta çalışmasına izin verir. GM kriyosoğutucunun valfi, tipik olarak 1-2 Hz frekansında çalışır. Bu nedenle, GM kriyosoğutucunun yerdeğıştiricisi, düşük sıcaklıklara dayanıklı, iyi bir sızdırmazlık gerektirir. Bunun sonucu olarak conta, yerdeğıştirici ile soğuk uçtaki silindir arasında çalışma sıvısının istenmeyen sızıntılarını önlemek için gereklidir. GM kriyosoğutucularda kompresör tipi, yağla yağlanan kompresördür ve yağla yağlanan kompresörlerin ömrü ise en az 5 yıldır (Radebaugh, 2020).



Şekil 3.9. Gifford-McMahon (GM) döngüsü (tek kademeli)

[Gifford, W. E., Longsworth R.C. (1964). *Pulse Tube Refrigeration*, Trans. ASME, p. 264].

Tek kademeli bir Gifford-McMahon çevrim düzeneğı, yukarıda Şekil 3.9’da temsili olarak gösterilmektedir.

Gifford-McMahon döngüsü dört aşamadan oluşur (Ventura ve Risegari, 2007):

- I. İlk aşama olan basınçlandırma aşaması için soğuk uçta yerdeğiştirme pistonu bulunur. Bu piston aracılığıyla sıkıştırılmış gaz, giriş valfi sayesinde sıcak hacme doğru akar.
- II. Sonrasında ise giriş valfinin açık kaldığı, yerdeğiştiricinin soğuk hacmi arttırmak için yukarı doğru hareket ettiği ve sonucunda sıcak uçtan gelen gazın rejeneratörden geçtiği giriş aşaması gelir.
- III. Daha sonraki aşamada, giriş valfinin kapatıldığı ve egzoz valfinin yavaşça açıldığı genleşme aşaması başlar ve soğuk uçta, soğutma işlemi gerçekleşir.
- IV. Son aşama olan egzoz aşamasında, kalan soğuk gazı rejeneratörden dışarı itmek için, yerdeğiştirici aşağı doğru hareket eder. Ardından egzoz valfi kapatılır ve döngü aynı aşamaları izleyecek şekilde tekrar eder.

GM kriyosoğutucular, düşük sıcaklık elde etmek için adyabatik gaz giderme genişlemesi prensibini yani bir başka deyişle Simon prensibini kullanan rejeneratif, küçük boyutlu, düşük sıcaklıklı kriyosoğutuculardır.

Tek kademeli GM kriyosoğutucuların belli kullanım alanları esas olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

- İletişim elektroniği
- Kriyopompalama
- Kriyojensiz mıknatıslar
- Soğutma kalkanları.

İki veya üç kademeli GM kriyosoğutucu versiyonlarının kullanımının mevcut olduğu bazı alanlar ise aşağıdaki gibi verilebilir:

- Mikrodalga yükselteçlerini soğutma
- Joule-Thomson helyum sıvılaştırıcıları ön soğutma
- Kriyostatlar
- Seyreltme buzdolaplarının helyum sıvılaştırıcı kısmı.

3.2.2.3 Vuilleumier (VM) Kriyosoğutucular



Fotoğraf 3.10. Vuilleumier (VM) kriyosoğutucu [Dogkas ve Rodgakis, 2018].

Vuilleumier (VM) kriyosoğutucular, kapalı motorda döngüsel basınç dalgalanmaları oluşturmak için yüksek sıcaklıklarda termal enerji kullanarak soğutma elde eden kriyosoğutuculardır. Bu termal tahrik ile soğutma üretme şeklinde gerçekleşen döngüye, Vuilleumier döngüsü denir. (Walker, 1983) Yukarıda Fotoğraf 3.10’da bir Vuilleumier kriyosoğutucu gösterilmektedir.

Vuilleumier döngüsü, düşük frekanslı çalışma modeli ile termal tahrikli Stirling soğutma döngüsünü birleştiren bir döngü olarak ifade edilebilir. Vuilleumier kriyosoğutucular, döngüsünün yapısı dolayısıyla termal tahrikli kriyosoğutucular adıyla da anılmaktadır. Yani Vuilleumier kriyosoğutucuların temelini oluşturan VM çevrimi, Stirling çevrimi üzerinden türetilmiş bir çevrimdir. Stirling çevriminden farklı olarak Vuilleumier çevrimi, bağlantı sağlayan iki yerdeğiştiriciye sahiptir ve mekanik kompresör bulundurmaz. Bu iki yerdeğiştiriciden birisi sıcak yerdeğiştirici iken, diğeri ise soğuk yerdeğiştiricidir. Sıcak yerdeğiştirici, soğuk yerdeğiştiriciye kıyasla daha büyük boyuta sahiptir. Sıcak yerdeğiştirici, ek bir ısı eşanjörüne sahiptir ve ayrıca sıcak yerdeğiştiricide, rejeneratör düzenlemesi de mevcuttur (Walker, 1983), (Wang ve ark., 2020)

Bir asırlık gelişim süreci içerisinde katettiği gelişmelerle birlikte VM kriyosoğutucular, ortam sıcaklığından, sıvı nitrojen sıcaklığına ve hatta sıvı helyum sıcaklığına kadar soğutma gücü elde ettiği ortaya konan soğutuculardır (Dogkas ve Rogdakis, 2018). Sıkıştırma, elektriksel ısının çalışma gazına aktarılmasıyla sağlanmaktadır (Walker, 1983), (Dogkas ve Rodgakis, 2018), (Wang ve ark., 2020).

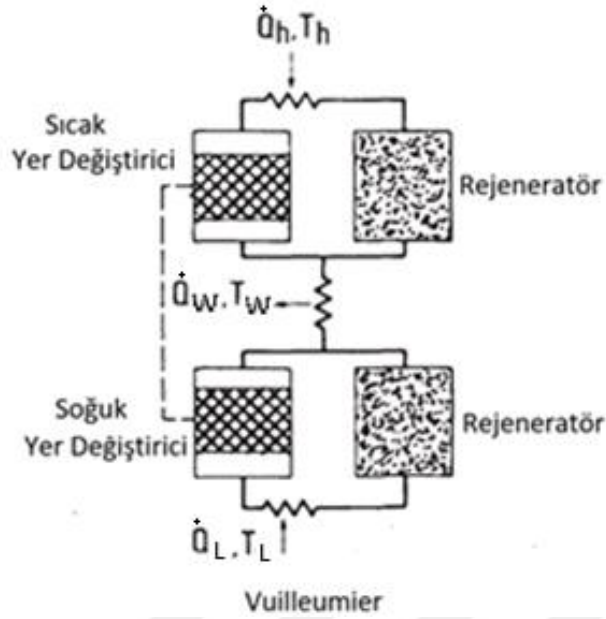
Yıl	Ülke	Yapı	Ön soğutma sıcaklığı	En düşük sıcaklık	Soğutma Gücü
1970s	Çin	Tek aşamalı hibrit Simon genişlemeli VM ^a	77 K	4.2K	-
1980ler	Japonya	Üç aşamalı VM ^a	77 K	7.7 K	8 mW@8.3 K
1980ler	Japonya	Çift aşamalı VM ^a	77 K & 16 K	5.4 K	7 mW@6.4 K
2002	Çin	Tek aşamalı VM-PT ^b	77 K & 20 K	3.5 K	12 mW@5.0 K
2016	Çin	Tek aşamalı VM ^a hibrit darbe tüplü kriyosoğutucu	77 K	4.4 K	50 mW@6.0 K
2018	Çin	Tek aşamalı VM-PT ^b	70.3 K	6.5 K	-
2018	Çin	Tek aşamalı çok-geçişli VM-PT ^b	71 K	3.7 K	13 mW@4.2 K
2019	Çin	Tek aşamalı VM ^a hibrit darbe tüplü kriyosoğutucu	77 K	2.2 K	10 mW@3 K
2019	Çin	Çift Aşamalı VM-PT ^b	70 K	3.9 K	4 mW@4.2 K

^a VM: Yerdeğiştirici tip Vuilleumier kriyosoğutucu

^b VM-PT: Vuilleumier tip darbe tüplü kriyosoğutucu

Tablo 3.3. VM kriyosoğutucularda yaşanan gelişmeler [Wang, J., Pan, C., Zhang, T., Luo, K. Q., Xi, X. T., Chen, L. B., Zhou, Y., Wang, J. J. (2020). *Progress of the 4 K-class Vuilleumier type cryocooler and its further applications. IOP Conference Series: Material Science and Engineering* 755(1)].

Vuilleumier kriyosoğutucular, Stirling kriyosoğutucularda bulunan mekanik kompresörün yerine termal kompresör kullanana kriyosoğutuculardır. Tek mekanik girdi bir elektrik motoru tarafından sağlanan iş girdisidir ve bu girdi yerdeğiştiricileri ileri geri taşımak için gereklidir. Vuilleumier kriyosoğutucuyu çalıştırmak için gereken mekanik kuvvetler, diğer kriyosoğutucu türlerinden önemli ölçüde daha düşük olduğu için, mekanik aşınmanın önemli ölçüde azaltılacağı ve bunun sonucunda çalışma ömrü ve güvenilirlikte bir artış yakalanacağı sonucu ortaya çıkar (Walker, 1983), (Wang ve ark., 2020).



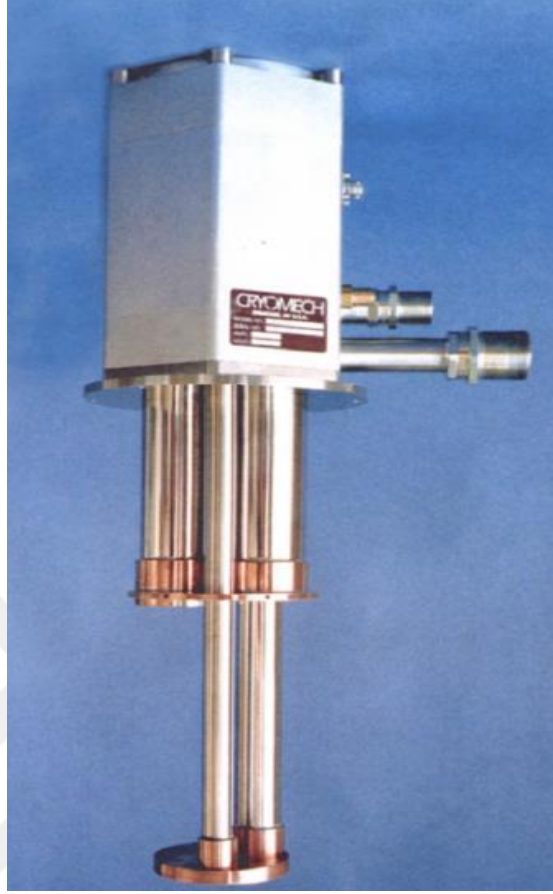
Şekil 3.10. Vuilleumier (VM) kriyosoğutucu döngüsel şema [Walker, 1983].

VM kriyosoğutucuların çalışma şeklini aşağıdaki gibi özetlemek uygun olacaktır:

- Kapalı bir motorda yüksek sıcaklıklarda termal enerji kullanılarak çevrimsel basınç dalgalanmaları oluşturulur. Basınç dalgaları oluşturmaktaki amaç, düşük sıcaklıklarda soğutma elde etmektir.
- Sonrasında yüksek sıcaklıklarda ve düşük sıcaklıklarda motor tarafından emilen ısı, çevre sıcaklıklarında atılır.
- Basınç dalgalanmaları, sıcak silindirdeki ileri geri hareket eden bir yerdeğiştiricinin hareketi ile gazın periyodik olarak bir ortam sıcaklığı bölgesinden, yüksek sıcaklıklı bir bölgeye aktarılması sonucu üretilir.
- Sıcak ve soğuk yerdeğiştiriciler, uygun fazlamayı ve senkronize çalışmayı sürdürmek için bir tür kinematik mekanizma ile birleştirilir. Çoğu durumda iş girişi bir elektrik motoru tarafından sağlanır (Walker, 1983).

Yerdeğiştiricileri sürmek amacıyla yeterli iş üretmek için, ısı girdisinin bir kısmını ustaca kullanan, kendi kendine etki eden sistemler yapılmıştır. Contalarla ilgili yaşanan zorluklar nedeniyle, bu çekici özelliğin kullanılabilirliğini sınırlandırılmaktadır (Walker, 1983).

3.2.2.4 Darbe Tüplü Kriyosoğutucular



Fotoğraf 3.11. U tipi geometriye sahip olan bir darbe tüplü kriyosoğutucu

[<https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/MIT-Cryo-Eng.shtml>].

Darbe (nabız) tüplü kriyosoğutucular (PTC), 1960'ta William Gifford ve onun araştırma asistanı olan Charles Longworth tarafından kazara keşfedilen bir buluş olarak ortaya çıkmıştır. İlk zamanlar darbe tüplü kriyosoğutucuların çalışma prensiplerinin gizemi çözülememişti. Sonraları darbe tüplü kriyosoğutucularda yer alan salınımlı akış süreçlerini açıklamak için, yüzyılı aşkın süre zarfında buhar sıkıştırılmalı buzdolabı gibi sabit akışlı sistemleri açıklamakta kullanılan geleneksel termodinamiğin yanında, salınımlı termodinamik (termoakustik) alanında genişlemelere de ihtiyaç duyulmuştur (Atrey, 2020). Darbe tüplü kriyosoğutucular, Stirling kriyosoğutucularla termodinamik süreçler açısından farklı olmasına karşın birbirine benzer kriyosoğutuculardır (Andrews, 1988). Yukarıda Fotoğraf 3.11'de u tipi geometriye sahip bir PTC gösterilmektedir.

Sonraki süreçte 1963 yılında, William Gifford ve Charles Longworth tarafından, ilk ticari darbe tüplü kriyosoğutucular geliştirildi. Temel darbe tüplü

kriyosoğutucular diye adlandırdığımız bu ilk ticari kriyosoğutucular kısaca BPTC olarak ifade edilmektedir (Andrews, 1988). BPTC'nin yapısı bir kompresör, bir rejeneratör, bir darbe borusu ve iki ısı eşanjöründen oluşmaktadır. BPTC yüksüz olarak 124 K gibi bir sıcaklığa ulaşmaktadır (Radebaugh, 2020).

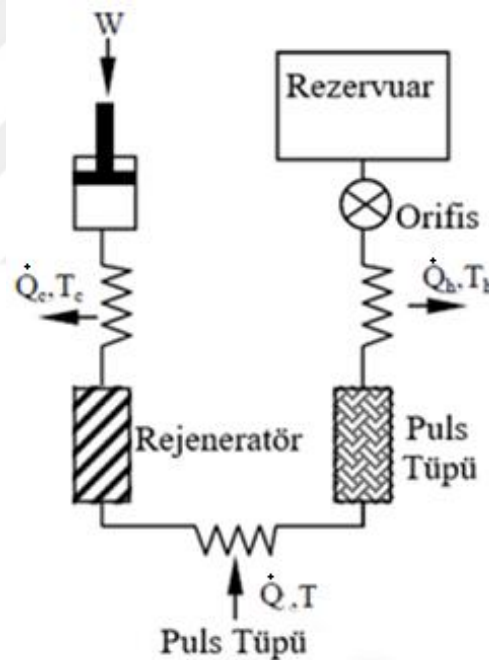
Darbe tüplü kriyosoğutucular, salınımlı basınçlar ve kütle akışları ile çalışırlar. Ayrıca soğuk uçta hareketli parça bulundurmazlar. Soğuk uçta hareketli parçanın olmamasıyla birlikte, BPTC'ler, Stirling ve GM kriyosoğutuculardan ayrışır. Soğuk uçta hareketli parça bulunmaması sistemi pozitif yönde etkilemektedir. Hatta tüm sistemde hareketli parça içermeyen modelleri bile geliştirilmiştir. BPTC, motora elektrik girişi kullanan mekanik bir sürücü bulundurmamak yerine, termoakustik sürücüye güç sağlamak için bir ucunda ısı girişi mekanizması buludurur. Büyük endüstriyel sistemlerde mekanik kompresör, hareketli parçası olmayan bir kriyosoğutucu elde etmek amacıyla iki tip termoakustik sürücüden biri ile değiştirilebilir (Radebaugh, 2020).

BPTC'de, basınç ile fazdaki uygun gaz hareketi, bir yarım döngü sırasında gazı depolamak için bir delik ve bir rezervuar hacmi kullanılarak elde edilir. Rezervuar hacmi, salınımlı akış sırasında ihmal edilebilir ve basınç salınımının meydana gelmesine yetecek büyüklüktedir. Darbe tüpünün işlevi, prosesleri iki uçundan yalıtmaktır. Yani sıcak uçtan akan gazın, akış tersine çevrilmeden önce darbe tüpünden sadece bir kısmının geçmesi için yeterli büyüklükte olması gerekir. Açıklıktan geçen salınımlı akış, Stirling ve Gifford-McMahon kriyosoğutucular için yerdeğiştiricinin yaptığı gibi, ısıtma ve soğutma etkilerini birbirinden ayırır (Radebaugh, 2003).

İlk zamanlar PTC kriyosoğutucular, daha çok bir deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere tasarlanırsa da, son zamanlarda birçok ticari alanda kullanımları yaygınlaşmaktadır. 1980'lerin başlarına kadar, o dönemler var olan kriyojenik sıcaklıklara ulaşmaktaki zayıflıklar gibi kısıtlar nedeniyle, akademik çalışma bağlamında çok fazla bir ilgi gördüğü söylenemez. Bu sebepten ilk zamanlar üzerine fazla sayıda çalışmaya yapılmayan PTC'ler, yakın zamanlarda bilimsel çalışma bağlamında yoğun bir rağbet görmektedir (Radebaugh, 2003).

Darbe tüplü kriyosoğutucularda, basınç dalgası üretici, aşınmaya ve arızaya maruz kalan tek mekanik olan aktif bileşen olduğundan kritik bir bileşendir. Bu

1980'li yılların başlarında, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda Wheatley ve ark., temel darbe tüplü kriyosoğutucuda kullanılan frekanstan çok daha yüksek frekanslarda ısı pompalama etkilerini araştırmaya başladılar. 1984 yılında, Moskova Bauman Teknik Enstitüsü'nde, Mikulin ve arkadaşları, temel darbe tüplü kriyosoğutucular üzerine yaptıkları çalışmalarla temel darbe tüplü kriyosoğutucuların yapısını geliştirdiler. Bu çalışmalarını sırasında Mikulin ve ark., darbe tüpü içerisindeki sıcak uca, bir delik (orifis) açtılar ve o deliği bir gaz rezervuarına bağladılar ve böylece orifis darbe tüplü kriyosoğutucular (OPTC) ortaya çıktı. Ortaya çıkan orifis darbe tüplü kriyosoğutucular, yüksüz vaziyette 105 K sıcaklığa soğutma sağladılar (Radebaugh, 2003), (Kakaç, 2003).



[Radebaugh, 1999-2000].

49

Yukarıda Şekil 3.11’de, bir OPTC çevrimi şematize edilmiştir. Bir OPTC çevrimi, aşağıdaki gibi sırasıyla, beş adımda özetlenebilir (Rawat, 2015):

- I. Piston, darbe tüpündeki gazı (helyumu) sıkıştırmak için aşağı doğru hareket eder.
- II. Isıtılmış ve sıkıştırılmış gaz, rezervuardaki basınç ortalamasından daha yüksek bir basınçta olduğu için, orifisten rezervuara doğru akar ve darbe tüpünün sıcak ucundaki ısı eşanjörü vasıtasıyla ortam ile ısı alışverişi yapar. Darbe tüpündeki basınç ortalama basınca düştüğünde akış durur.
- III. Piston yukarı hareket eder ve gazı, darbe tüpünde adyabatik olarak genişletir.
- IV. Darbe tüpündeki bu soğuk ve düşük basınçlı gaz, haznedeki açıklık aracılığıyla gaz akışı tarafından, darbe tüpünün soğuk ucuna doğru akışa zorlanır.
- V. Daha sonra soğuk gaz, darbe tüpünün soğuk ucundaki ısı eşanjöründen akarken, soğutulmakta olan nesneden ısıyı emer. Darbe tüpündeki basınç ortalama basınca yükseldiğinde akış durur. Çevrim bundan sonra başa dönerek aynı adımları izleyecek şekilde devam eder.

1985 yılında NIST/Boulder’da, Radebaugh ve ark., sıcak ısı değiştiricinin bir akış düzleştirici olarak hareket etmesine izin vermek için, orifisi darbe borusunun dışına taşıdılar ve kolay bir optimizasyon için, sabit orifisi ayarlanabilir bir iğneli valf ile değiştirdiler. Ayrıca buna ilave olarak, çalışma gazını da helyum olarak değiştirdiler. Bu yapılan birtakım modifikasyonlarla birlikte OPTC’ler, 60 K sıcaklığa soğutma sağlar hale geldiler (Radebaugh, 2003), (Radebaugh, 2020).

1990 yılında, NIST ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı’nın iş birliği ile Termoakustik tahrikli orifis darbe tüplü kriyosoğutucular geliştirildi. Uzun bir isme sahip olan bu kriyosoğutucular kısaca TADOPTC şeklinde de ifade edilmektedirler. TADOPTC ile doğal gaz sıvılaştırma işlemi yapılabilir (Radebaugh, 2020).

1990 yılında, ayrıca Jiaotong Üniversitesi’nde, Zhu ve ark., darbe tüpünün sıcak ucunu, ikinci bir delik içeren bir tüp ile ana gaz girişine bağlayarak çift girişli bir darbe tüpü kriyosoğutucu ürettirler ve böylece gazın bir kısmı, rejeneratörü baypas ederek sıcak uçtan darbe tüpüne girebilir hale geldi (Zhu ve ark., 1990). Bunun sonucunda, geliştirdikleri çift girişli darbe tüplü kriyosoğutucularla daha düşük sıcaklıklara ulaşılabileceğini keşfettiler (Radebaugh, 2009). Çift girişli darbe

tüplü kriyosoğutucular, kısaca DPTC olarak ifade edilmektedir (Ventura ve Risegari, 2007).

1990-1991 yılları arasında, rejeneratör, darbe tüpü ve ısı eşanjör mekanizmasının daha iyi anlaşılması için yapılan çalışmalar ve bu çalışmalar sonucu elde edilen kazanımlar sonucunda darbe tüplü kriyosoğutucular, verim olarak da 80 K sıcaklıkta, Stirling kriyosoğutucular ile karşılaştırılabilir düzeye gelmişlerdir. Ancak 1990'larda, NIST ve diğer laboratuvarlarda darbe tüpü kriyosoğutucularla 40 K'nin altındaki sıcaklıklara ulaşılmasına rağmen bu sıcaklıklar için, verim olarak Stirling kriyosoğutuculardan düşük verimler söz konusuydu (Radebaugh, 2003).

1994 yılında, Matsubara, üç aşamalı bir DPTC ile 3.6 K sıcaklığa ulaştı (Matsubara ve Gao, 1994), (Ventura ve Risegari, 2007).

1999 yılında, üç aşamalı bir DPTC ile 1.78 K sıcaklığa ulaşıldı (Fereday ve ark., 2006). Birkaç yıl boyunca, bu sıcaklık, bir PTC tarafından ulaşılan en düşük sıcaklık olarak kaldı (Ventura ve Risegari, 2007).

1999 yılında, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda, Backhaus ve Swift tarafından, daha önce 1979 yılında Ceperley'in önermiş olduğu hareketli parçası olmayan bir termoakustik ısı motoru konsepti, darbe tüpü kriyosoğutucularda uygulamaya geçirildi. 2000 yılında, Praxair Şirketi ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nın iş birliği ile, kısaca adı TASHE-OPTC olarak ifade edilen termoakustik tahrikli, Stirling ısı motorlu, orifis darbe tüplü kriyosoğutucuların ticari üretimine başlandı (Radebaugh, 2003), (Radebaugh ve Ross, 2015).

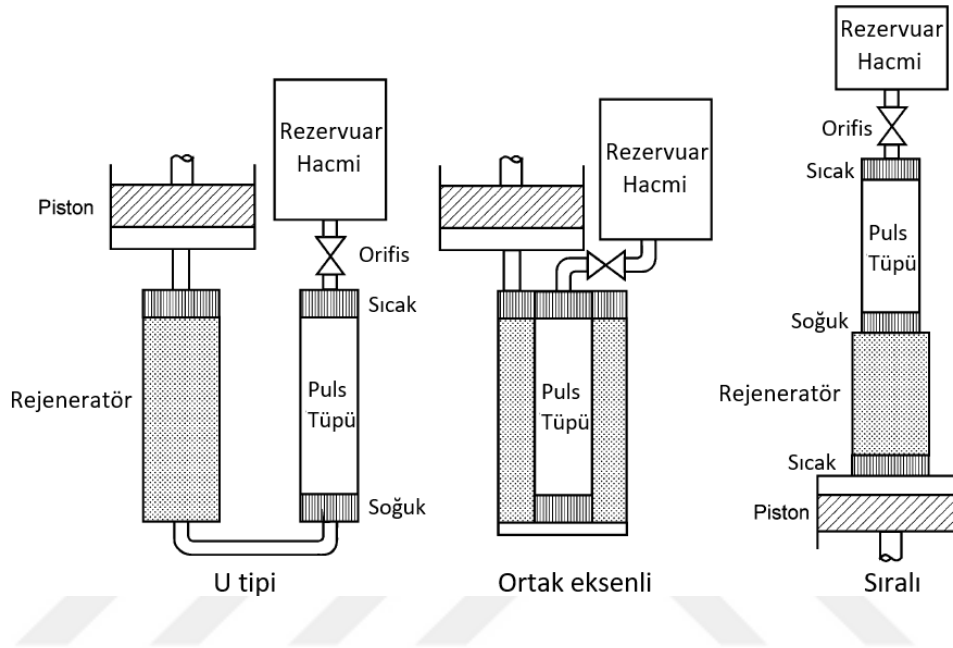
2003 yılında, Giessen Üniversitesi'nden G. Thummes ve grubu, 1.27 K sıcaklığa ulaşan çift devreli bir $^3\text{He}/^4\text{He}$ PTC geliştirdi (ter Brake ve Wiegerinck, 2002), (Ventura ve Risegari, 2007).

2007 yılına gelindiğinde, PTC, 4.2 K'de, yaklaşık 1.5 W ve 45 K'de ise yaklaşık 40 W soğutma gücü sağlar hale ulaştı (Ventura ve Risegari, 2007).

Günümüzde, NIST tarafından geliştirilen deneysel amaçlı minyatür darbe tüplü kriyosoğutucular da mevcuttur. Deneysel amaçlı tasarlanan bu kriyosoğutucuların ilerleyen zamanlarda uzay alanında kullanıma sahip olması planlanmaktadır. Lockheed Martin'in geliştirdiği 4 K Stirling tip darbe tüplü kriyosoğutucular ile 3.8 K sıcaklıklara soğutma gerçekleştirilmiştir (Radebaugh ve Ross, 2015).

Darbe tüplü kriyosoğutucular, darbe tüpünün ve rejeneratörün geometrik düzenine göre dört farklı konfigürasyona sahiptir:

- Doğrusal veya sıralı
- U tipi
- Ortak eksenli
- Dairesel



Şekil 3.12. Üç farklı darbe tüplü kriyosoğutucu geometrik konfigürasyonu

[Radebaugh, 2020].

Darbe tüplü kriyosoğutucuların bazı uygulama alanları aşağıdaki gibidir:

- Nitrojen, hidrojen, helyum, doğal gaz gibi gazların sıvılaştırılması.
- SQUID manyetometreleri.
- Süperiletken mıknatısların soğutulması.
- Füze rehberliği için kızılötesi sensörlerin soğutulması.
- Kriyovakum pompaları.
- Kriyocerrahi.
- Yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin ve yarı iletkenlerin soğutulması.
- Nükleer aktiviteyi izlemek için gama ışını sensörleri.
- Biyolojik materyallerin, kanın, biyolojik örneklerin vb. korunması.

referans olarak tersine çevrilebilir iş yapma potansiyelini temsil eder. Gerçek bir termodinamik çalışma terimi olmadığından, bazen hidrodinamik iş akışı, hidrodinamik güç veya akustik güç olarak adlandırılır. Denklem (3), akustik gücün, referans durumu P_0 ve T_0 olan bir kullanılabilirlik veya ekserji akışı olarak ifade edilebileceğini göstermektedir. Spesifik kullanılabilirlik veya ekserji “ $h-T_0.s$ ” olarak verilir (Radebaugh, 2003).

İdeal durumda darbe tüpü içindeki işlemler adyabatik ve tersinirdir. Bu durumda entropi çevrim boyunca sabit kalır, bu da aşağıda (4) numaralı denklemdeki eşitliği verir.

$$\langle \dot{S} \rangle = 0 \text{ (ideal durum)}. \quad (4)$$

Denklem (2) ve (3) çok geneldir ve akış ve basınç zamanın sinüzoidal fonksiyonları olmasa bile salınımlı herhangi bir termodinamik sistem için geçerlidir. Sinüzoidal ise akustik güç şu şekilde, Denklem (5)’te gösterildiği gib yazılabilir: w

$$\langle P_d \dot{V} \rangle = \left(\frac{1}{2} \right) P_1 \dot{V}_1 \cos \Theta = \left(\frac{1}{2} \right) RT_0 \dot{m}_1 \frac{P_1}{P_0}, \quad (5)$$

Denklem (2-4) akustik güç açısından maksimum veya brüt soğutma ısını vermek için birleştirilebilir ve aşağıdaki (6) nolu denklemdeki eşitlik elde edilir (Radebaugh, 1999-2000):

$$\dot{Q}_{max} = \langle P_d \dot{V} \rangle. \quad (6)$$

Bu basit ifade çok genel bir ifadedir ve Stirling ve Gifford-McMahon kriyosoğutucular için de geçerlidir. Bu iki buzdolabında akustik iş, hareketli yerdeğiştirici tarafından gerçek genişleme çalışmasına dönüştürülür. Bu iş, P-V diyagramının alanını bularak kolayca ölçülebilir. Darbe tüplü buzdolabı durumunda, işi çıkarmak veya bir P-V diyagramını ölçmek için hareketli bir yerdeğiştirici yoktur. Bu nedenle, akustik gücü belirlemek için hacim veya kütle akış hızı bir akış ölçer tarafından ölçülmelidir. Bu tür ölçümlerin, akışı ve dolayısıyla soğutma gücünü bozmadan darbe tüpünün içinde gerçekleştirilmesi zordur. İyi yalıtılmış bir darbe tüpü boyunca dışarıya ısı değişimi olmadığı için,

Birinci Yasa, darbe tüpünden geçen zaman ortalamalı entalpi akışının bir uçtan diğerine sabit olduğunu gösterir. Daha sonra, Denklem (3)'e göre entropi üretmek için darbe tüpü boyunca hiçbir kayıp olmadığı sürece, akustik g   sabit kalır. Delikten geçen anlık akış hızı, haznedeki küçük basınç salınımını    erek ve anlık kütle akış hızını bulmak için ideal gaz yasasını kullanarak kolayca belirlenir. Ani basınç, darbe tüpünün sıcak ucunda kolayca     l r ve akustik g   bulmak için bunun çarpımı ve hacim ak ş  Denklem (6)'ya göre entegre edilir. İdeal bir OPTC'ye ait olan ve Denklem (5) ve (6)'da götüren entalpi akış modeli, 1986 gibi erken bir tarihte Radebaugh ve ark. tarafından tart ş ld  (Radebaugh ve ark., 1986) ve sonraki birkaç yıl içinde rafine edildi (Storch ve Radebaugh, 1988), (Radebaugh, 1990), (Storch ve ark., 1990).

Darbe Tüpü Kayıpları ve Ba arım Sayısı

Gerçek bir darbe tüplü kriyoso utucuda hem rejeneratörde hem de darbe tüpünde kayıplar olacaktır. Bu kayıplar, net soğutma gücünü bulmak için brüt soğutma gücünden çıkarılabilir. $\langle \dot{H}_r \rangle$ 'nin neden olduğu rejeneratör kaybı, genellikle en büyük kayıptır ve sadece NIST (Garry ve ark., 1985), (Garry ve Radebaugh, 1990) tarafından geliştirilen REGEN3.1 gibi karmaşık sayısal analiz programları ile doğru bir şekilde hesaplanabilir (Radebaugh, 1999-2000). Diğer önemli kayıplar da;

- (a) gaz ve boru duvar  arasındaki anlık ısı transferi kaynaklı kayıplar,
- (b) türbülans nedeniyle sıcak ve soğuk gaz bölümlerinin karışması gibi etkilerden darbeli t p içinde entropi oluşumuyla ilişkili kayıplar,
- (c) titreşimli basınç ve duvarla gaz etkileşimleri tarafından oluşturulan darbe tüpü içindeki gazın akustik ak ş  veya dolaşım  ile ilgili kayıplar ve
- (d) adyabatik bir hacimden, izotermal bir hacme geçişle bağlantılı son etki kay plarıdır.

(b), (c) ve (d) ile ilişkili zaman ortalamalı entropi akışları her zaman negatiftir, yani darbe tüpünden kompresöre akış, (a) ile ilişkilidir. Entropi ak ş , kritik sıcaklık gradyanının aşıldığı kriyojenik sıcaklıklarda negatiftir, ancak sıcaklık gradyanının kritik değerden düşük olduğu daha yüksek sıcaklıklarda pozitiftir. 1988 ve 1995 yılları arasında geliştirilen darbe tüplü kriyoso utucuların termoakustik modelleri (Swift, 1988), (Tominaga, 1993), (Xiao, 1993), (Xiao,

1995), (a) ile ilişkili entropi akışını hesaplar, ancak (b) ve (c) ile ilişkili entropi akışlarını hesaplamak için henüz yeterince model geliştirilmemiştir. Darbe tüpündeki bu entropi akışları, negatif olduğundan, entalpi akışı ve dolayısıyla soğutma gücü, Denklem (2)'ye göre, akustik güçten daha az olacaktır. Denklem (7)'de ideal bir gaz için darbe tüpünün FoM değeri (Rawlins ve ark., 1998) aşağıdaki gibi eşitlikle tanımlanır:

$$FoM = \frac{\langle \dot{H} \rangle}{\langle P_d \dot{V} \rangle} = \frac{T_c}{T_h}, \quad (7)$$

FoM için ölçülen değerler, küçük darbe tüplerinde (Rawlins ve ark., 1998), yaklaşık 0.55 ila 0.85 arasında; akustik akışın hafif bir daralma ile ortadan kaldırıldığı çok büyük darbe tüplerinde, 0.96 kadar yüksek bir değerde olabilir. Burada hesaplanan FoM değerleri, daha sonra darbe tüpü performansının hesaplamalarında ampirik faktörler olarak kullanılır (Radebaugh, 1999-2000).

Fazın Akış ve Basınç Arasındaki Etkisi

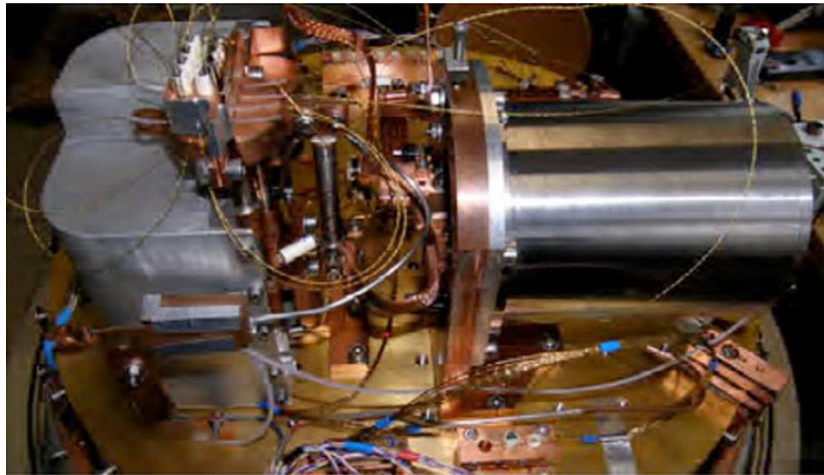
Denklem (5)'te, belirli bir basınç genliği ve akustik güç için, kütle akış genliğinin $\theta = 0$ için minimize edildiği gösterilmiştir. Böyle bir faz, ağızda meydana gelir, yani akış, basınçla aynı fazdadır. Bununla birlikte, darbe tüpüyle ilişkili hacim nedeniyle, darbe tüpünün soğuk ucundaki akış, doğru boyutta bir darbe tüpünde basıncı yaklaşık olarak 30° yönlendirir. Rejeneratördeki gaz hacmi, rejeneratörün sıcak ucundaki akış sonucu, basıncı daha fazla yönlendirir. Örneğin, 50 ila 60° yönlendirmesine neden olacaktır. Bu büyük faz farkıyla, rejeneratörün sıcak ucundaki kütle akışının genliği, belirli bir akustik gücü rejeneratörden iletmek için, oldukça büyük olmalıdır. Bu büyük kütle akışı genliği, büyük basınç düşüşlerine ve ayrıca rejeneratörde zayıf ısı alışverişine yol açar. Rejeneratör boyunca ortalama genlik en aza indirildiği takdirde, bu kayıplar, minimum olur. Bu durum, soğuk uçtaki akış basıncı geride bıraktığında ve sıcak uçtaki akış basıncı yönlendirdiğinde meydana gelir. Soğuk uçta 30° 'lik bir gecikme yaklaşık optimum değerdir. Bu faz açısını elde etmek için darbe tüpünün sıcak ucundaki akışın, normal 0° faz açısından, yaklaşık -50 ila -60° arasında kaydırılması gerekir. Son yıllarda, darbe tüpünün sıcak ucundaki akış ile basınç arasındaki faydalı faz kaymasına neden olmak için iki farklı mekanizma geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar, darbe tüplü kriyosoğutucularda verimliliğin artmasına yol açmıştır (Radebaugh, 1999-2000).

3.3 Ultra Düşük Sıcaklıklara (Sub-Kelvin) Soğutma Teknikleri

Sub-Kelvin (Kelvin-altı) soğutma teknikleri, 1 K'nin altındaki sıcaklıklara gerçekleştirilen soğutma işlemlerini kapsar ve bu soğutma teknikleri, yoğun madde fiziği, kuantum hesaplama ve astronomik gözlem alanlarında yaygın olarak kullanıma sahiptir. Bünyesinde bulunan temel üç teknoloji; sorpsiyonlu soğutma, adyabatik demanyetizasyon soğutması ve seyreltme soğutmasıdır. Sub-Kelvin soğutma sistemleri arasında seyreltme soğutması, birkaç mK'e kadar düşük sıcaklık, sürekli soğutma ve nispeten büyük soğutma gücü avantajlarıyla en popüler olanıdır (Zu ve ark., 2022).

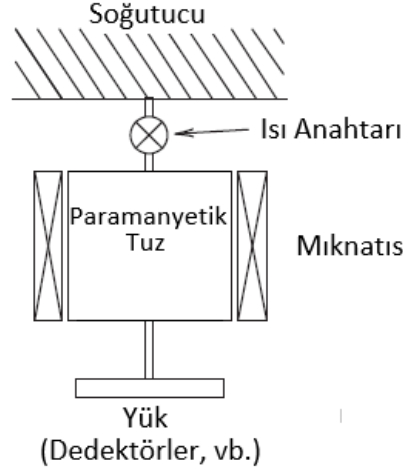
3.3.1 Adyabatik Demanyetizasyon Buzdolapları (ADR)

Adyabatik demanyetizasyon buzdolapları, manyetokalorik etkiyi (MCE) kullanarak elde ettikleri manyetik soğutma etkisiyle, ultra düşük sıcaklıklarda soğutma gerçekleştirebilen sistemlerdir. ADR'ler, 100 mK altı sıcaklıklara ulaşabilmektedirler. Adyabatik demanyetizasyon buzdolabının kullanım şekli, ilk olarak 1926 yılında, Peter Debye ve sonrasında 1927 yılında, William Francis Giaque tarafından tanımlandı (Zhao ve Wang, 2019). Aşağıda Fotoğraf 3.12'de, örnek bir ADR prototipi gösterilmektedir.



Fotoğraf 3.12. Minyatür ADR prototipi [Duband ve ark., 2017].

ADR'ler, tipik olarak bir 1 K'den birkaç mK'e kadar olan sıcaklık aralığında kullanılır ve ısı yüküne bağlı olarak, yaygın ADR'ler, birkaç dakikadan bir haftaya kadar, herhangi bir yerde soğutma süreleri sunabilirler (Shirron, 2014). Aşağıda Şekil 3.14'tek aşamalı bir ADR'ye şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.14. Tek aşamalı ADR şematik gösterimi [Shirron, 2014].

ADR'nin çalışma prensibini belirleyen manyetokalorik etki, en temel düzeyde, belirli malzemelerin artan veya azalan manyetik alanlara maruz kaldıklarında ısındığı veya soğuduğu olgusuna dayanmaktadır. Manyetokalorik etki, paramanyetik malzemelerde bir dış manyetik alanın, eşleşmemiş dış kabuk elektronlarının manyetik momenti ile etkileşiminden kaynaklanır. Bu etkileşim, manyetik alana ve sıcaklığa güçlü bir şekilde bağımlılığa sahip olan bir entropi etkisiyle sonuçlanır (Shirron, 2014).

3.3.2 Seyreltme Buzdolapları (DR)

Seyreltme buzdolapları, çalışma prensibi olarak ^3He - ^4He seyreltme işlem teorisini baz alan ve ultra düşük sıcaklıklara soğutma yapan sistemlerdir (Weisend, 2012). Seyreltme soğutması, soğutma üretmek için dolaşımdaki ^3He 'yi kullanır. Elektromanyetik parazit olmadan, nispeten büyük bir soğutma gücü ile birkaç mK'e kadar sürekli soğutma sağlar (Zu ve ark., 2021). Geçmişte DR'lerin, sıvı helyum kriyostatları ile önceden soğutulması gerekirken, şimdilerde modern DR'ler, bunun yerine darbe tüplü kriyosoğutucular ile önceden soğutulmaktadır (Uhlig, 2002), (Uhlig, 2015).

Seyreltme buzdolapların ortaya çıkmasındaki sürece değinmek gerekirse, öncelikle 1948 yılında, ilk olarak L. Landau ve I. Pomeranchuk, “çok seyreltilmiş ^3He ’nin, süperakışkan ^4He içinde, yarı-parçacıklardan oluşan bir gaz gibi davranacağı” görüşünü ortaya attılar. Ardından 1951 yılında, Landau ve Pomeranchuk’un görüşlerini dikkate alan Heinz London, esas seyreltme buzdolabının ortaya çıkmasını sağlayan kendi önerisini ortaya çıkardı. Bu öneriye göre; ^3He ’nin, süperakışkan ^4He ile seyreltilmesiyle soğutma elde edilebilirdi (London, 1957). 1951 yılında, Oxford Uluslararası Düşük Sıcaklık Fiziği Konferansı’nda, ^3He ’nin, süperakışkan ^4He ile seyreltilmesiyle ortaya çıkan entropinin beraberinde, seyreltilen ^3He ’nin genişleyebilen bir Fermi gazı gibi davrandığı sonucu ortaya kondu. O dönem, ^3He ’yi temin etmekteki zorluklar nedeniyle seyreltme buzdolabının geliştirilme süreci biraz kesintiye uğradı. ^3He doğada çok nadir bulunan bir helyum izotopudur ve genellikle yapay olarak yüksek maliyetle üretilir (Weisend, 2012). Bu zorluğun aşılması adına ^3He - ^4He karışımlarının özellikleri, buhar basıncı, karışım entalpisi, faz ayrımı ve 0.003 K’e (ve teorik olarak 0 K’e) kadar seyreltik çözeltilerin varlığı incelenerek ^3He temini adına çözüm bulunması gerekiyordu. Heinz London’un önerisi üzerine, çok sayıda laboratuvar da birçok grup tarafından, seyreltme buzdolabı üretmek adına girişimlere başlandı. Bu gruplardan biri de Leiden’deki Das ve ark. idi. 1962 yılında, H. London, G. R. Clarke ve E. Mendoza, karışımların ozmotik basıncı üzerine sundukları ölçümlerin tartışılma esnasında, işe yarayabilecek iki olası buzdolabı tasarımının eskizlerine yer verdiler (London, 1957), (Shoenberg, 1971), (Ventura ve Risegari, 2007), (Vilches, 2019).

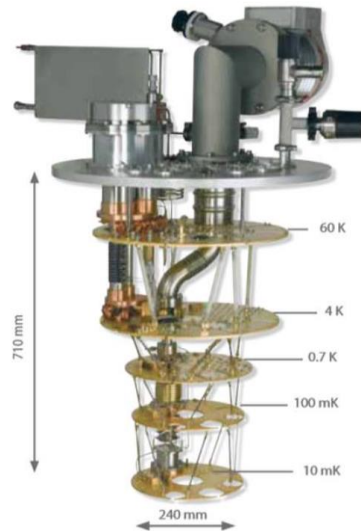
1964 yılında, Leiden’de, Das ve ark., oda sıcaklığındaki bir pompa aracılığıyla, ^3He ’nin devridaiminin eklenmiş olduğu bir buzdolabı geliştirdiler, ancak muhtemelen konvektif kararsızlık ve zayıf ısı eşanjörleri nedeniyle, yaklaşık planladıkları 200 mK altı sıcaklığa ulaşmakta başarısız oldular. 1965 yılında, pes etmeyen Das ve ark., bu kez Heinz London’un ^3He - ^4He seyreltme işlemi teorisine sonradan ilave edilen faz ayırma işleminin katkısıyla, ilk seyreltme buzdolabını geliştirdiler ve bu buzdolabı 0.22 K sıcaklığa soğutma gerçekleştirdi (Radebaugh ve Siegwarth, 1971), (Ventura ve Risegari, 2007), (Hall, 2018). 1965-66 yıllarında, Moskova ve Manchester’da sürekli çalışan 0.05 K’e soğutan DR’ler geliştirildi. 1966 yılında, Illinois Üniversitesi’nde, gelişmiş ısı eşanjörleri ile geliştirilmiş bir

DR, 0.02 K'ye ulaştı. Ardından önceden soğutulan tek döngülü ve sürekli çalışan bir DR, 0.0044 K sıcaklığa ulaştı (Ventura ve Risegari, 2007), (Vilches, 2019).

1968 yılında, Wheatley ve ark., sürekli 0.010 K civarı sıcaklıklara ulaşmak için, ısı eşanjörleriyle alakalı pratik değerlendirmelerin çok kapsamlı bir açıklamasını bulunduran akademik yayınlarını literatüre sundular. Buna ek olarak, daha sonraki yayınlarında seyreltme buzdolabının mekanizmasında yer alan eş eksenli ısı eşanjörleri hakkında çok yeni bilgileri sundukları başka yayınlar da çıkardılar (Radebaugh ve Siegwarth, 1971).

Günümüzde, geleneksel seyreltme soğutmasıyla elde edilebilecek en düşük sıcaklık 1.75 mK'dir. 100 mK'de en büyük soğutma gücü 2 MW'dır. Ayrıca günümüzde başlıca seyreltme soğuması çalışmaları şöyledir; seyreltme soğutmasının ticarileştirilmesini, oda sıcaklığında pompalama sistemi olmadan soğuk çevrim seyreltme soğutmasını ve uzay uygulamaları için sıfır-g seyreltme soğutmasını içeren özel uygulamalar geliştirmek gibi çalışmalar sayılabilir (Zu ve ark., 2021).

İki adsorpsiyon pompası tarafından çalıştırılan, zemindeki soğuk çevrim seyreltme buzdolabı, minimum 8 mK sıcaklığa ulaşabilir ve buna karşılık gelen soğutma gücü 110 mK için 60 μ W'dir. Bir açık çevrim seyreltme buzdolabı, Sıfır g uzay uygulamaları için, 92.6 mK'da 0.1 μ W soğutma gücü ile 2,5 yıl boyunca uzayda başarıyla çalıştırılmıştır. Sıfır-g ortamı için kapalı çevrim seyreltme buzdolapları geliştirmek üzerine çalışmalar devam etmektedir (Zu ve ark., 2021). Aşağıda Fotoğraf 3.13'de örnek bir kuru seyreltme buzdolabı gösterilmektedir.



Fotoğraf 3.13. Kriyojensiz (kuru) seyreltme buzdolabı iç yapısı [Batey ve Guteberg, 2015].

3.3.3 ^3He Sorpsiyonlu Buzdolabı

Sorpsiyonlu buzdolapları, sorpsiyon pompası kullanarak bir buharlaştırıcıdan sıvıyı buharlaştırarak soğutma üreten sistemlerdir. Sorpsiyon pompası, sorpsiyon buzdolaplarında ^3He için geniş bir yüzey alanına ve büyük bağlama enerjisine sahip bir miktar malzeme içermektedir. Bu "alıcı" soğuk olduğunda, ^3He , yüzeyine güçlü bir şekilde çekilir ve bu da malzemenin üzerinde çok düşük bir denge buhar basıncına neden olur. Bu, bir pompa görevi görmesine ve böylece evaporatörden sıvının büyük ölçekli buharlaşmasını sağlamasına izin verir. Kalan sıvı, buharlaşma hızı ısı yükünü dengeleyene kadar soğutulur. Prensip, bu nokta yüzey alanı ve malzeme (bağlanma enerjisi) değiştirilerek değiştirilebilir, ancak pratikte yüzey alanının o kadar büyük olması gerekir ki, helyum tamamen adsorbe edildiğinde atomik tabakanın sadece bir kısmını kaplar. böylece pompalama aşaması boyunca denge basıncı düşük kalır. Sonuç olarak, evaporatör tipik olarak ^3He için 300 mK (^4He buzdolapları için 1 K) sınır sıcaklığına yakın veya orta derecede altında pompalanır. Temel sıcaklık, sorpsiyon pompası sıcaklığını düzenleyerek uzun zaman ölçeklerinde stabilize edilebilir, ancak kısa vadeli kontrol, evaporatöre bağlı yüklerin ısıtıcı kontrolü ile gerçekleştirilir. Parazitik ısı yüklerini en aza indirmek ve düşük empedanslı bir pompalama yolu sağlamak için dikkatli tasarım (veya çoklu aşamaların kullanımı) ile, 200 mK veya biraz daha düşük nihai sıcaklıklar kanıtlanmıştır (Shirron ve ark., 2009).

Buzdolabının bekleme süresi boyunca, ısı emildiği için sıvı buharlaşır. Sıvı tükendiğinde, sorpsiyon pompası ^3He gazını desorbe etmek ve yeniden yoğunlaştırmak için ısıtılır. Kömür kullanılarak yapılan tipik bir sorpsiyon pompası için, gazı desorbe etmek için sıcaklık yaklaşık 50 K'ye yükseltilmelidir. Yere dayalı soğutucularda, sıvının evaporatöre geri damladığı ısı emiciye sabitlenmiş bir kondansatör kullanılabilir; alan soğutucular için evaporatörde yeniden yoğunlaştırılması gerekir. Evaporatörün içi, yüzey gerilimi sıvıyı hapsedecek ve duvarlarla ısıl temasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Yoğuşma aşamasında evaporatörü ısı emiciye termal olarak bağlamak ve soğuma ve çalışma aşamasında ısıl olarak izole etmek için bir ısı anahtarı kullanılır. Soğutucu, kritik ^3He (3.2 K) kritik noktası kadar sıcak olabilir, ancak bu, ^3He basıncını kritik değerin üzerine çıkarmak için sorpsiyon pompasının yüksek sıcaklığa ısıtılmasını gerektirir. Bunun yerine, gereken gücü azaltmak ve çalışma noktasına soğutmak için

buharlaştırılması gereken helyum miktarını azaltmak için ısı alıcılar tipik olarak 2.5 K veya daha düşüktür (Shirron ve ark., 2009).

3.4 Kriyojenik Soğutucularda Karşılaşılabilecek Potansiyel Problemler

Kriyosoğutucularda karşılaşılabilecek potansiyel problemler söz konusudur. Bu problemlerin başlıcalarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Radebaugh, 1999-2000):

- Güvenilirlik
- Verimlilik
- Boyut ve ağırlık
- Titreşim
- Elektromanyetik girişim (EMI)
- Isı reddi
- Maliyet.

Stirling:

- Sıvı Azot Üretim Sistemi :18 adet

Aşağıda Fotoğraf 4.2 ODTÜ Laboratuvarı'nda bulunan bir Stirling sıvı üretim sistemi gösterilmektedir.



Fotoğraf 4.2. ODTÜ Merkezi Laboratuvar Stirling Sıvı Azot Üretim Sistemi.

- Askeri Amaç İçin Kullanılan Minyatür Stirling: Tam olarak sayısı bilinmiyor, yaklaşık 400 adet.

Gifford McMahon:

- Sıvı Azot Üretim Sistemi: 36 sistem.
- Bilimsel Araştırma: 27 sistem.
- MRI Sistem: Tam olarak sayısı bilinmiyor, yaklaşık 150 adet.

Darbe Tüplü:

- Helyum Sıvılaştırma: 5 sistem.
- Bilimsel Araştırma: 3 sistem.

Fotoğraf 4.3'de Türkiye'de üretilen Prova Cryogenics'e ait bir darbe tüplü kriyosoğutucu prototipi bulunmaktadır.



Fotoğraf 4.3. Prova Pulse Tube Prototipi.

BAİBÜ ve ODTÜ’de bulunan kriyostat örnekleri sırasıyla Fotoğraf 4.4. ve Fotoğraf 4.5’te gösterilmiştir.



Fotoğraf 4.4. BAİBÜ Fen Edebiyat Fakültesi kriyostat.



Fotoğraf 4.5. ODTÜ GÜNAM Fen Edebiyat Fakültesi kriyostat.

5. KARŞILAŞTIRMA BULGULARI

5.1 Kriyosoğutucu Maliyeti ve Seçimi

Maliyet açısından değerlendirme yaparken Türkiye’de mevcut olan ve tercih edilen sistemler açısından bir bilgilendirme yapılacaktır.

Gifford-McMahon kriyosoğutucu ile küçük ölçekli sıvı azot üreten sistemler (0-240 lt/gün), Stirling kriyosoğutucu ile sıvı azot üreten sistemlere nazaran daha düşük fiyatlara sahiptir. Örneğin; 120 lt/gün kapasiteye sahip olan bir Gifford McMahon kriyosoğutucu sistemi (İmtek Cryogenics CNP120) için fiyat 110.000€ iken, aynı kapasiteye sahip olan bir Stirling kriyosoğutucu sistemi (Stirling Cryogenics StirLIN-1 Economy) için fiyat 190.000€ şeklindedir. 240 lt/gün kapasiteli sistemlerde ise iki tip sistem (İmtek Cryogenics CNP240 ve Stirling Cryogenics StirLIN-1 Compact) için de fiyat 220.000€ civarındadır. Stirling çevrim verimi görece yüksek olduğu için bu kapasite ve bu kapasiteden büyük sistemlerde Stirling kriyosoğutucular tercih edilmektedir. 2000 lt/gün kapasitesinin üstündeki kapasiteler için ise Brayton ve Linde-Hampson çevrime sahip kriyosoğutuculu sıvılaştırıcılar kullanılmaktadır.

Bilimsel araştırma için düşük sıcaklıklar istendiğinden Gifford-McMahon ve darbe tüpü kriyosoğutucular tercih edilmektedir. Araştırmalarda titreşim önemli ise darbe tüpü kriyosoğutucular kullanılır. Stirling tipi çok düşük sıcaklıklı kriyosoğutucular da prototip olarak üretilmiş olsalar da yüksek titreşim ve yüksek maliyetler sebebiyle piyasada yer bulamamıştır.

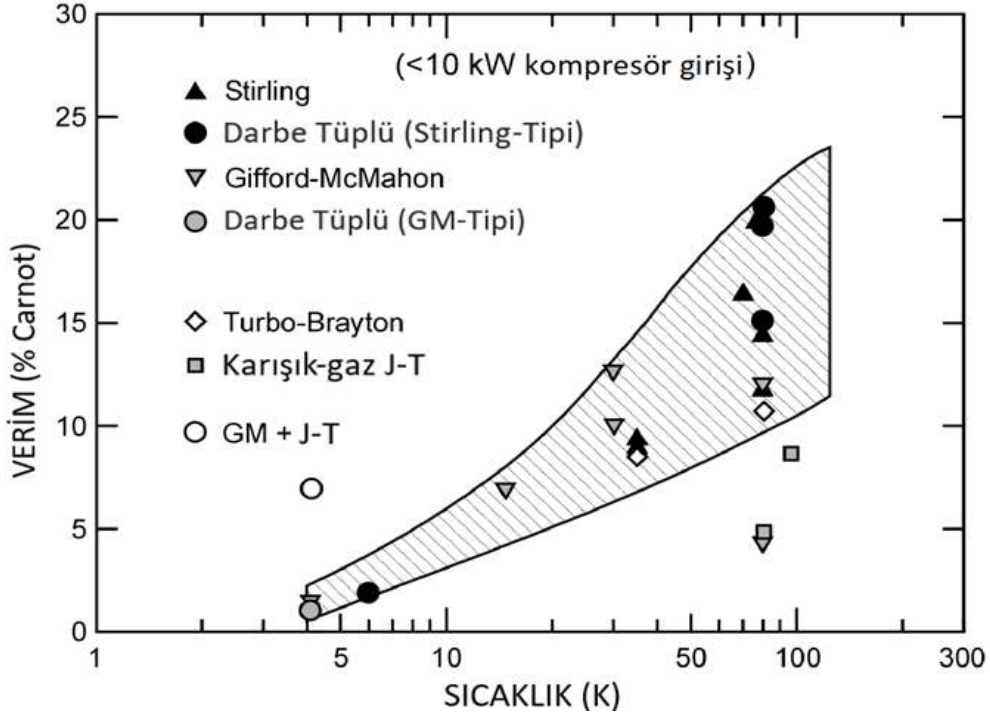
Joule-Thomson ve Claude kriyosoğutucular ise büyük çaplı tesislerin soğutma sistemlerinde entegre olarak kullanılmaktadır.

Küresel kriyosoğutucu pazar raporlarını incelediğimiz zaman en çok tercih edilme eğiliminde olan kriyosoğutucular olarak ön plana çıkan kriyosoğutucular Gifford-McMahon ve Stirling kriyosoğutuculardır.

5.2 Soğutma Kapasitesi, Sıcaklık ve Güç Tüketimi

Bu başlık altında kriyosoğutucu maliyeti dışında değineceğimiz diğer önemli kriyosoğutucu seçim kriterleri olan soğutma kapasitesi, sıcaklık ve güç tüketimi yanında diğer bilgilere de değinilecektir.

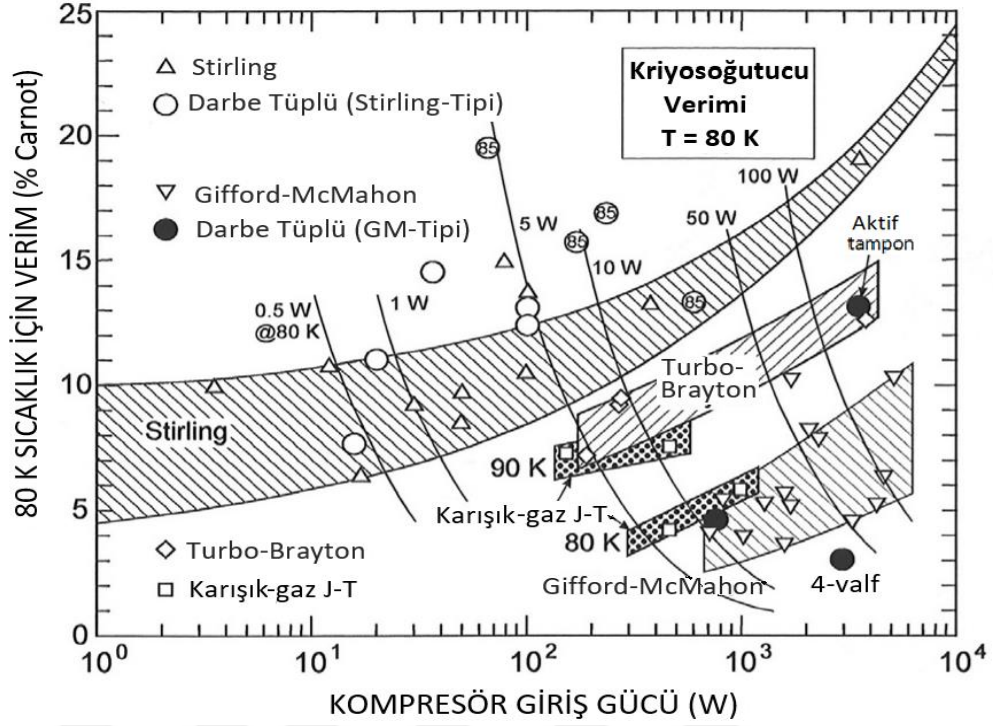
Aşağıda Şekil 5.1’de farklı tipte kriyosoğutucularda 10 kW altı kompresör girişi için “% Carnot Verimi - Sıcaklık Grafiği” verilmiştir.



Şekil 5.1. Kriyosoğutucularda 10 kW Altı Kompresör Güç Girişi İçin Operasyon Sıcaklıklarında Carnot Verimi Grafiği [Radebaugh, R. (2009). *Cryocoolers: The State of The Art and Recent Developments. Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(21), IOP Publishing, Boulder, USA.]

Yukarıdaki Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, 10 kW altı kompresör girişi için, 5 ila 10 K sıcaklıklara ulaşabilen kriyojenik soğutucular; Gifford-McMahon kriyosoğutucular, Stirling tipi darbe tüplü kriyosoğutucular, GM tipi darbe tüplü kriyosoğutucular ve GM – J-T hibrit kriyosoğutuculardır.

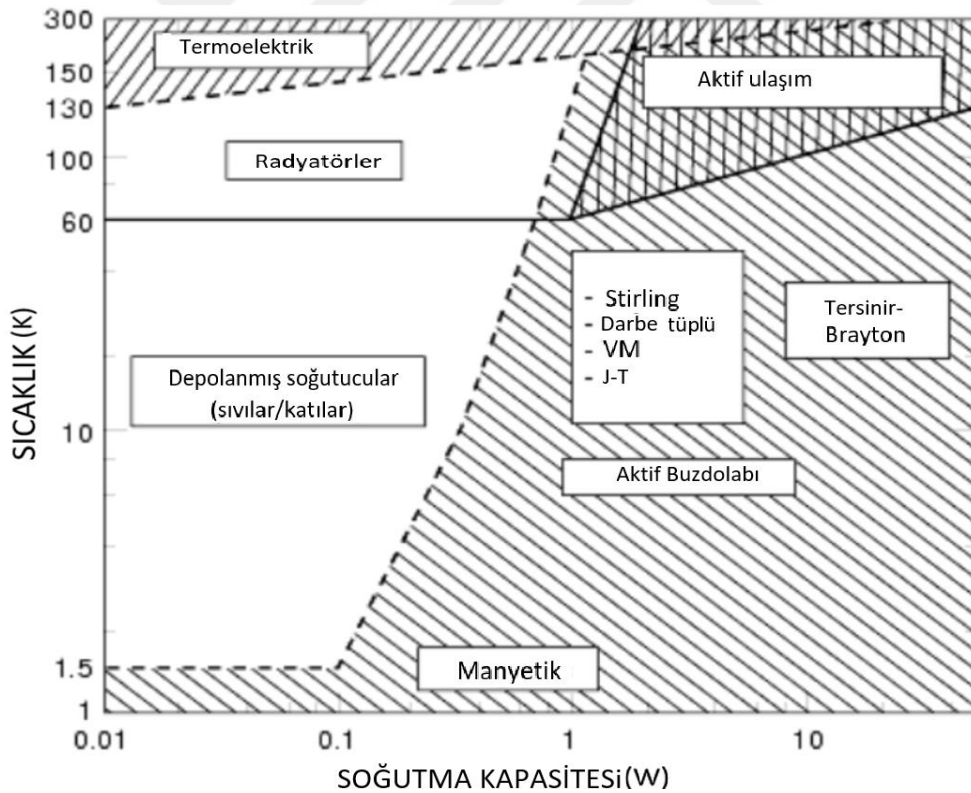
Ayrıca Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, 10 kW altı kompresör güç girişi için, soğutma yapılan sıcaklık düştükçe, % Carnot verimi düşüş eğilimindedir. Kriyosoğutucuların tamamı 40 ila 100 K sıcaklıklara soğutma yapmaktadır. Tek akışkanlı J-T kriyosoğutucular, 10 kW altı güç girişi için, grafikte yer alacak sıcaklık değerlerine ulaşamadığı için grafikte yer almamaktadır, buna karşın Karışık akışkanlı J-T (Kleemenko) kriyosoğutucular ise grafikte yer almaktadır.



Şekil 5.2. Kriyosoğutucularda 80 K Sıcaklık İçin Kompresör Giriş Gücüne Bağlı Carnot Verimi Grafiği [Radebaugh, 1999-2000].

Yukarıda Şekil 5.2’te, 80 K sıcaklıkta farklı kriyosoğutucular için kompresöre giriş gücü % Carnot verim değerleri karşılaştırılmaktadır. Veriler çoğunlukla, 1990 ila 2016 arası yıllara aittir ve her türden yüksek verimli Ar-Ge kriyosoğutucularını içermektedir (Radebaugh, 2020). En yüksek verimli ticari Stirling kriyosoğutucu (80 K’de 1.2 kW soğutma gücüne sahip ve Carnot verimi %29,5), kinematik versiyon olarak bilinen bir döner motor ve krank mili kullanır. Şekil 5.2’deki grafikte gösterilen en yüksek verimli kriyosoğutucu (Carnot verimi %30), lineer motorları kullanan bir Ar-Ge entegre Stirling kriyosoğutucudur (Penswick ve ark., 2014), (Radebaugh, 2020). Şekil 5.2’de gösterilmemesine rağmen, herhangi bir kriyosoğutucu ile elde edilen en yüksek verim, çok büyük bir Stirling kriyosoğutucuda 77 K’de, 20 kW soğutma gücü ile Carnot veriminin %41’idir (Dros, 1965), (Radebaugh, 2020). En yüksek verimli darbe tüplü kriyosoğutucu (Carnot veriminin %24’ü) 2015’e aittir ve bir sıcak yer değiştirici içerir (Wang ve ark., 2015), (Radebaugh, 2020). Bir sonraki en yüksek verimli darbe tüplü kriyosoğutucu (Carnot’un veriminin %22’si) bir darbe tüpü kullanır ve 2010 yılındandır (Hu ve ark., 2010), (Radebaugh, 2020). Taktik kriyosoğutucuların 2015 araştırması (Yi ve Yuan, 2015), (Radebaugh, 2020) 35 farklı modeli gözden

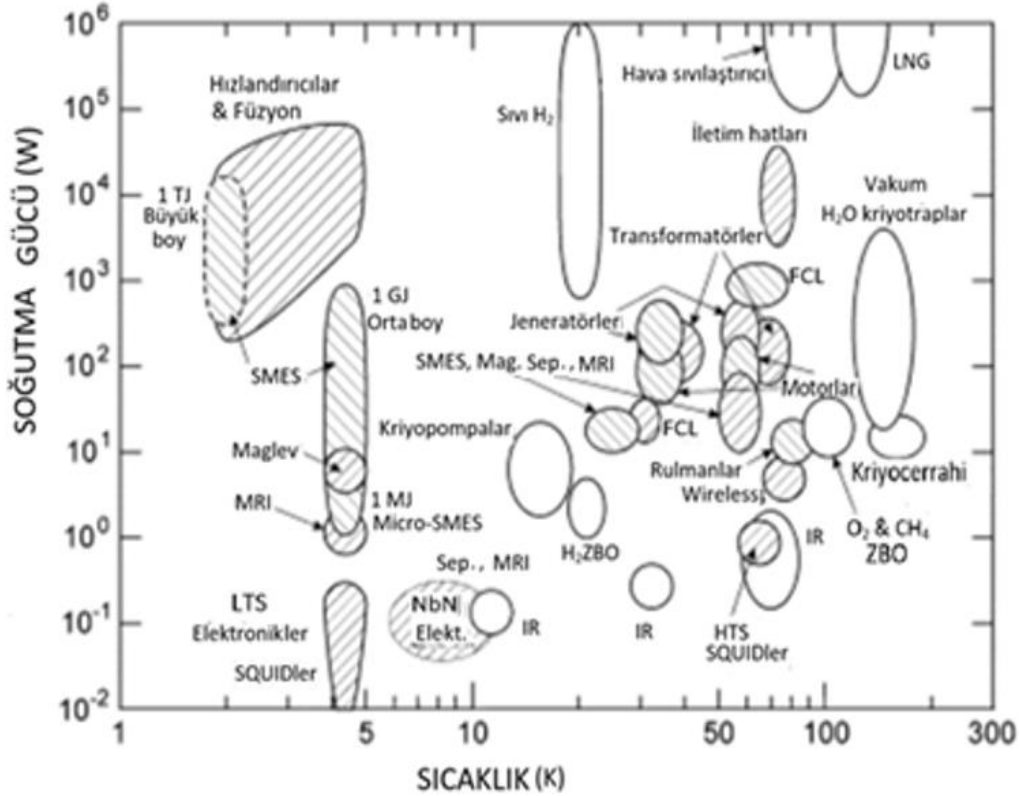
geçirdi. Bu rakamdan iki gerçek ortaya çıkıyor. Birincisi, daha büyük boyutlarla verimliliklerin artması ve ikincisi, Stirling benzeri (valfsiz) kompresörlere sahip darbe tüplü kriyosoğutucuların, Stirling kriyosoğutucular kadar verimli olmasıdır. Daha yüksek güçlerle daha yüksek verimlilik eğiliminin göze çarpan bir istisnası, Şekil 5.2'de gösterildiği gibi darbe tüplü kriyosoğutucularınkidir. Darbe tüplü kriyosoğutucuların yaklaşık 100 W'tan daha yüksek soğutma güçleri için verimliliklerinde düşüş yaşanması hem rejeneratör hem de darbe tüpündeki akış homojensizliklerine bağlanır (Dietrich, Yang ve Thummes, 2007), (Radebaugh, 2020). Karışık gazlı J-T (Kleemenko) kriyosoğutucuların verimliliği, sıcaklık 80 K'den 90 K'ye yükseltildiğinde hızla artarken, diğer kriyosoğutucuların verimliliği, bu sıcaklık aralığında sıcaklıkla çok az değişir. Bu küçük kriyosoğutucuların verimliliği, (Strobridge, 1974) tarafından yapılan araştırmanın 1 W'lık bir soğutma gücünde ortalama %2 Carnot verimi gösterdiği 1974'ten bu yana önemli ölçüde artmıştır (Radebaugh, 2020).



Şekil 5.3. Çeşitli Soğutma Sistemleri İçin Sıcaklık-Soğutma Kapasitesi Grafiği

[<https://indico.cern.ch/event/90787/sessions/113897/attachments/1093421/1559932/Cryo-course-cycles-2010.pdf>].

Yukarıda Şekil 5.3'te çeşitli soğutma sistemleri için soğutma aralıkları verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi soğutma yapılacak aralığı dikkate almak çok önemli bir kıstastır ve bu bağlamda doğru soğutucu seçmek açısından “nerede ve ne amaç için kullanacağız?” ve “hangi soğutma aralığında çalışacağız?” soruları ile bir sorgulama yaparak sayısal veriler ve maliyeti de göz önünde bulundurularak doğru soğutma sistemini seçebiliriz. Bu sorgulama sonucunda seçilen kriyosoğutucu modeli üretici firmadan temin edilerek sistemlere entegre edilebilir.



Şekil 5.4. Kriyojenik Soğutma Sistemleri İçin Kullanım Yeri Göre Soğutma Gücü-Sıcaklık Haritası [Radebaugh, 2004].

Yukarıda Şekil 5.4'te kriyosoğutma sistemleri için kullanım yerleri göz önüne alınarak yapılan bir haritalandırma yer almaktadır. Şekilden de anlaşılacağı gibi farklı kriyojenik uygulama alanları için farklı soğutma sıcaklığı aralıkları söz konusudur. Belirtilen her bir uygulama alanı için de içinde bulunduğu koşullar göz önüne alınarak belli başlı kriyojenik soğutma teknikleri ön plana çıkartılabilir. Koşullardan kasıt çalışacağı sıcaklık aralığı, amacı (hızlı soğutma gibi), soğutma süresi, kullanım yeri gibi kriterleri göz önüne almak. Örneğin; kriyopompalar, vakum odasındaki buharları kriyosoğutucu soğuk kafasına bağlı genişletilmiş bir

yüzey üzerinde dondurarak çalışır. Soğuk kafa periyodik olarak odadan izole edilir ve buharları desorbe etmek için ısıtılır. Kriyopompa uygulamaları için ön plana çıkan kriyojenik soğutma sistemleri, tipik olarak iki aşamalı GM kriyosoğutuculardır.

Joule-Thomson kriyosoğutucularda verimliliği artırmak için çok yüksek basınçlara ihtiyaç olmakla birlikte değerlendirme kriteri olarak hızın ön plana çıkması durumunda öncelik J-T kriyojenik soğutma sistemlerine kayar. J-T sistemlerde sıcaklık olarak daha düşük sıcaklık gerekli oluyorsa karışık akışkana başvurulur. Yani Kleemenko (karışık akışkanlı J-T) kriyosoğutucular kullanılır.

Aşağıda Tablo 5.1’de, Cryomech Şirketine ait farklı 20-25 K sıcaklıkta Gifford-McMahon kriyosoğutucu modellerine ait sıcaklığa göre soğutma kapasitesi, 60 Hz çalışma frekansına göre giriş gücü, baz alınan sıcaklık, bekleme süresi ve kompresör paketi verileri verilmiştir.

Tablo 5.1. 20-25 K sıcaklıkta farklı GM kriyosoğutucu modellerine ait veriler
[<https://www.cryomech.com/cryocoolers/gifford-mcmahon-cryocoolers/>].

20-25 K GM Kriyosoğutucu					
Model	Kompresör Paketi	Soğutma Kapasitesi	Bekleme Süresi	Güç Tüketimi 60 Hz (Giriş Gücü)	Baz Sıcaklık
AL63	CP103	5 W @ 20 K	15 dk – 80 K	3.5 kW	≤ 17 K
AL230	EBM2850	25 W @ 20 K	25 dk – 40 K	5.1 kW	14 K
AL330	EBM2870	40 W @ 20 K	25 dk – 80 K	7.5 kW	12 K
Al325	CPA1110	100 W @ 25 K	< 1 saat	11.2 kW	12 K
Al630	CPA1114	100 W @ 20 K	< 1 saat	12.7 kW	≤ 12 K

Aynı şekilde aşağıda Tablo 5.2’de, Cryomech Şirketine ait farklı 80 K sıcaklıkta çalışan Gifford-McMahon kriyosoğutucu modellerine ait veriler paylaşılmıştır.

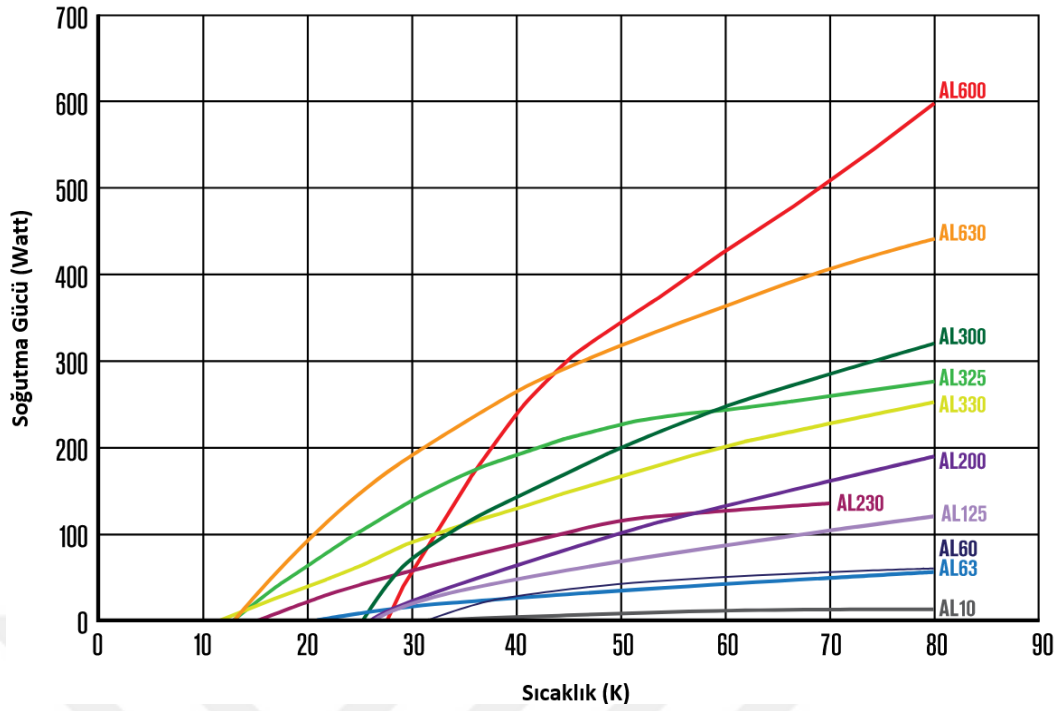
Tablo 5.2. 80 K sıcaklıkta farklı GM kriyosoğutucu modellerine ait veriler
[<https://www.cryomech.com/cryocoolers/gifford-mcmahon-cryocoolers/>].

80 K GM Kriyosoğutucu					
Model	Kompresör Paketi	Soğutma Kapasitesi	Bekleme Süresi	Güç Tüketimi 60 Hz (Giriş Gücü)	Baz Sıcaklık
AL10	CP101	14 W @ 80 K	15 dk – 80 K	1.3 kW	20 K
AL60	CP102	60 W @ 80 K	15 dk – 80 K	2.0 kW	25 K
AL125	CP103	120 W @ 80 K	15 dk – 80 K	3.9 kW	25 K
AL200	EBM2850	190 W @ 80 K	15 dk – 80 K	5.1 kW	25 K
AL300	EBM2870	320 W @ 80 K	15 dk – 80 K	7.5 kW	25 K
AL600	CPA1114	600 W @ 80 K	15 dk – 80 K	12.5 kW	25 K

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de Cryomech Şirketi’ne ait kriyosoğutucu modelleri, Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, bir grafik altında gösterilerilebilir. Sonrasında da grafik üzerinden değerlendirme yapılabilir. Bu değerlendirmede diğer ölçütler de değerlendirmeye katılabilir. Örneğin, bütçe, kullanım yeri, istenen koşullar vb. ölçütleri de göz önüne alarak uygun GM kriyosoğutma modeli seçimi yapabiliriz. Firma kataloglarında modeller için önemli birçok ölçüte için veriler bulunmaktadır.

Ayrıca firmanın verdiği belirtmekte fayda olan diğer veriler:

- Çalışma saati 8000 saat veya 3 yıl garanti
- Bakımlar arası süre 10.000 saat ve bakımı kolay
- İdeal çalışma sıcaklık aralığı 12-120 K



Şekil 5.5 Farklı sıcaklıkta farklı GM kriyosoğutucu modellerine ait Soğutma Gücü - Sıcaklık Grafiği [<https://www.cryomech.com/cryocoolers/comparison-chart/>].

Aşağıda Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te sırasıyla tek kademeli, standart iki kademeli ve 4 K iki kademeli darbe tüpü kriyosoğutucu sistemleri ile ilgili Cryomech Şirketi’nin farklı modelde GM kriyosoğutucularına ait soğutma kapasitesi, 60 Hz çalışma frekansına göre giriş gücü, baz alınan sıcaklık, bekleme süresi ve kompresör paketi verileri verilmiştir.

Tablo 5.3. Tek kademeli farklı PTC kriyosoğutucu modellerine ait veriler [<https://www.cryomech.com/cryocoolers/pulse-tube-cryocoolers/>].

Tek Kademeli PTC Kriyosoğutucular					
Model	Kompresör Paketi	Soğutma Kapasitesi	Bekleme Süresi	Güç Tüketimi 60 Hz (Giriş Gücü)	Baz Sıcaklık
PT10	CP101	12 W @ 80 K	15 dk – 80 K	1.3 kW	35 K
PT30	CP102	37 W @ 80 K	15 dk – 80 K	2.1 kW	35 K
PT60	CP103	60 W @ 80 K	20 dk – 80 K	3.3 kW	<30 K
PT63	CP103	11 W @ 30 K	20 dk – 80 K	3.5 kW	<25 K
PT90	EBM2850	90 W @ 80 K	15 dk – 80 K	5.0 kW	32 K

Tablo 5.4. Farklı standart çift kademeli PTC kriyosoğutucu modellerine ait veriler
[<https://www.cryomech.com/cryocoolers/pulse-tube-cryocoolers/>].

Standart Çift Kademeli PTC Kriyosoğutucular					
Model	Kompresör Paketi	Soğutma Kapasitesi	Bekleme Süresi	Güç Tüketimi 60 Hz (Giriş Gücü)	Baz Sıcaklık
PT403	CP103	4 W @ 20 K /8 W @ 65 K	60 dk – 10 K	3.4 kW	8 K
PT405	EBM2850	8 W @ 20 K /40 W @ 80 K	60 dk – 10 K	4.9 kW	8 K
PT407	EBM2870	14 W @ 20 K /80 W @ 80 K	60 dk – 10 K	8.0 kW	8 K
PT410	CPA289C	22 W @ 20 K /100 W @ 80 K	60 dk – 10 K	10.7 kW	10 K
PT415	CPA1110	28 W @ 20 K /130 W @ 80 K	60 dk – 10 K	~13 kW	≤10 K

Yukarıda Tablo 5.4’te standart PTC kriyosoğutucular için verilen veriler ile aşağıda Tablo 5.5’te 4 K PTC kriyosoğutucular için verilen verileri mukayese ederek aynı kademeye sahip ama farklı sıcaklık aralığında soğutma yapan iki farklı PTC model grubunun aralarındaki verisel değerlerin nasıl bir farklılığa sahip olduğunu gözlemleyebiliriz.

Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te verilen PTC kriyosoğutucu modelleri GM tipi PTC kriyosoğutuculardır. Ayrıca Stirling tipi ve VM tipi PTC kriyosoğutucularda mevcuttur. Bunlar içinde en yaygın kullanılan PTC kriyosoğutucular GM tipi PTC ve Stirling tipi PTC kriyosoğutuculardır.

Tablo 5.5. Farklı 4 K çift kademeli PTC kriyosoğutucu modellerine ait veriler
[https://www.cryomech.com/cryocoolers/pulse-tube-cryocoolers/].

4 K Çift Kademeli PTC Kriyosoğutucular					
Model	Kompresör Paketi	Soğutma Kapasitesi	Bekleme Süresi	Güç Tüketimi 60 Hz (Giriş Gücü)	Baz Sıcaklık
PT403	CP103	0.25 W @ 4.2 K /7 W @ 65 K	90 dk – 4 K	3.0 kW	2.8 K
PT405	EBM2850	0.5 W @ 4.2 K /25 W @ 65 K	60 dk – 4 K	4.9 kW	2.8 K
PT407	EBM2870	0.7 W @ 4.2 K /25 W @ 55 K	60 dk – 4 K	7.0 kW	2.8 K
PT410	CPA289C	1.0 W @ 4.2 K /40 W @ 45 K	60 dk – 4 K	8.4 kW	2.8 K
PT415	CPA1110	1.5 W @ 4.2 K /40 W @ 45 K	60 dk – 4 K	10.7 kW	2.8 K
PT420	CPA1114	2.0 W @ 4.2 K /55 W @ 45 K	60 dk – 4 K	12.5 kW	2.8 K
PT425	CPA1114	2.7 W @ 4.2 K /55 W @ 45 K	60 dk – 4 K	13.0 kW	2.8 K

Ultra düşük sıcaklıklara soğutma yapan sistemlerin hangileri olduğundan daha önce bahsedip kısaca bilgi vermiştik. Hatırlamak gerekirse, ultra düşük sıcaklıklara soğutma teknikleri; sorpsiyonlu buzdolapları, ADR, seyreltme buzdolabıydı. Bunlara ek olarak çok yaygın olarak bulunmasa NIS buzdolapları da sayılabilir. Literatür bilgisi kısmında yaygın kullanıma sahip sorpsiyonlu buzdolaplarından biri olan ^3He sorpsiyonlu buzdolaplarından bahsetmiştik. Bunun yanında $^3\text{He}/^4\text{He}$ sorpsiyonlu buzdolapları da mevcuttur. Aşağıda Tablo 5.6’da ultra düşük sıcaklıklara soğutma tekniklerine ait çeşitli kriyosoğutma sistemleri hakkında yapı, çalışma sıcaklığı, baz sıcaklık ve güç tüketimi ile ilgili bilgiler mevcuttur.

Tablo 5.6. Ultra düşük sıcaklığa soğutma tekniklerine ait veriler [*Shirron ve ark., 2009*].

Teknoloji	Yapı	Çalışma Sıcaklığı	Soğutma Gücü	Baz Sıcaklık	Güç Tüketimi
Sorpstiyonlu Buzdolabı	³ He, Tek Kademe	300 mK	10 µW	1.5 K	3.7 MW
	³ He, İki Kademe	300 mK, 240 mK	-	2.5 K	-
	³ He/ ⁴ He, Üç Kademe	2.5 K, 300 mK, 240 mK	-	5 K	-
ADR	Tek Kademe	60 mK	0.3 µW	1.3 K	0.15 MW
	İki Kademe	50 mK	0.4 µW	1.8 K	0.12 MW
	Sürekli, Dört Kademe	50 mK	6 µW	5 K	3.0 MW
Seyreltme Buzdolabı	Açık Çevrim	100 mK	0.1 µW	4.5 K	2.0 MW
NIS Buzdolabı	-	190 mK	-	0.3 K	-

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Kriyojenik soğutma teknikleri üzerine yapılan bu çalışmada görülen sonuç şudur ki kriyojenik soğutma sistemlerinin belli kapasiteleri, maliyetleri, etkin çalışma sıcaklıkları, etkin çalışma frekansları, boyutları ve öncelikli kullanım yerleri gibi özellikleri mevcuttur. Kriyojenik soğutma yapmak amacıyla kriyosoğutucu seçerken bu özelliklerin göz önünde bulundurulması, incelenecek sistemlere ait verilerin ve kurulum yapılacak yerin özellikleri baz alınarak seçim yapılması gereklidir. Şayet bir alanda ön planda olan kriyojenik soğutma sistemi, başka bir alanda yüksek maliyetli, düşük kapasitede kalabilir. Ayrıca belirtmekte fayda var ki teknolojisine, marka ve modeline göre kriyosoğutucular farklı özelliklere sahiptir, o sebepten ötürü kesin çizgilerle şu sistem, şu aralık için uygun veya şu aralık için uygun değil ayrımı yapmak doğru olmaz. Zira, birçok firma literatürde belirtilen değer aralıkların üstünde veya altında prototip modeli olduğunu belirtmektedir.
2. Kriyojenik soğutma teknikleri üzerine yapılan bu derleme çalışması göstermiştir ki Türkiye’de bu alan üzerine bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Birçok ülkede belli başlı firmalarda, kriyojenik soğutma teknikleri hakkında know-how bilgisi oldukça iyi seviyededir. Bu firmalar bilgilerini paylaşma konusunda isteksiz pozisyonda bulunmaktadırlar. ABD, Hindistan gibi ülkeler kriyojenik soğutma teknolojileri hakkında başarılı ülkeler olarak ifade edilebilir.
3. Ülkemizde, kriyojenik soğutma teknikleri hakkında know-how bilgisini artırmak amacıyla, kriyojenik alanında yürütülecek çalışmaları koordine edecek, proje destekleri ve bilgiler sunacak bir çalışma koordinasyon merkezi eksikliği bariz bir şekilde görülmektedir. Bu bağlamda, Hindistan’da olduğu gibi Kriyojenik Mühendisliği Merkezi (Hindistan Kharagpur Teknoloji Enstitüsü’nde) benzeri bir yapı kurularak önemli bir adım atılabilir. Uluslararası Kriyojenik Mühendislik Komitesi (ICEC) ile birlikte çalışılarak bilgi kazanımı elde edilebilir ve hazırlanacak projeler için destekler alınabilir.
4. Ülkemizde akademik bağlamda üst düzeyde, geniş kapsamlı kriyojenik çalışmalar yapmaya elverişli laboratuvar bulunmamaktadır. Laboratuvar

kurulmasıyla çalışmalarda sıçrama oluşabilir ve alana dönük ilgi artırılabilir ve ayrıca yüksek lisans programlarına Kriyojenik Mühendisliği dersleri eklenebilir.

5. Ülkemizde yurt dışından kriyojenik soğutma sistemi satın alımları gerçekleştiği için yüksek maliyetlere katlanılmaktadır. Bu teknolojilerin yerli olarak imal edilmesi ile yurt dışı bağımlılık azaltılarak katma değer elde edilebilir ve maliyetler düşürülebilir. Bu kapsamda, yerli kriyojenik soğutma sistemleri üretecek firmalara destekler verilmeli ve büyümeleri sağlanmalıdır. Bunun yanında, ICEC ile çalışarak firmalar adına destekler alınabilir.
6. Ülkemizde kriyojenik soğutma alanını istenen düzeye getirmek adına, bu alanda başarılı ülkelerin (ABD, Hindistan) kriyojenik soğutma stratejileri ve düzenlemeleri incelenerek stratejik plan ve kanuni düzenlemeler ortaya konularak rota çizilmesi adımıyla bir girişimde bulunulabilir.
7. Hassas sensörler ve uzay araçlarının soğutulmasında kriyosoğutucuların potansiyeli yüksek seviyededir. ABD’de ve birçok ülkede, bu belirtilen alanlar için kriyojenik soğutma sistemleri geliştirmek üzerine çok sayıda Ar-Ge çalışması mevcuttur. Bu bağlamda, bu belirtilen ileri teknolojilere olan ilgiyi artırmak, alan içerisinde yer edinmek açısından önem arz etmektedir. Unutulmamalı ki uzay teknolojisi, birçok teknolojinin tetikleyicisi ve kılavuzu bir teknoloji alanıdır ve uzay alanda kriyojenik soğutma üzerine sağlanacak atılımlar, uzun vadede diğer sektörlere de katkıda bulunacaktır. Dolayısıyla ülkemizin de uzay alanında faaliyetlerini hızlandırdığı şu günlerde, kriyojenik soğutma alanının önemi bir kez daha artmaktadır.
8. Minyatür ve mikro kriyosoğutucular, yoğun akademik ve ticari ilgiye sahip kriyosoğutuculardır. Örneğin, NASA, uzay alanında kullanılmak üzere minyatür turbo-Brayton kriyosoğutucu geliştirecek olan firmalara maddi teşvikler sunmaktadır. Minyatür ve mikro kriyosoğutucular üzerine yapılacak bilimsel ve akademik Ar-Ge çalışmalarına ihtiyaç olduğu barizdir. Bu alanda yapılacak Ar-Ge çalışmalarıyla, ülkemiz adına katma değerli kazanımlar elde edilebilir.
9. Darbe tüplü kriyosoğutucular, epey gelişme gösteren ve potansiyeli artış eğiliminde olan daha yeni sayılabilecek kriyosoğutucu tiplerinden biridir.

Darbe tüplü kriyosoğutucular üzerine yapılacak Ar-Ge ve inovasyon çalışmalarıyla beraber, darbe tüplü kriyosoğutucu geliştirme alanında teknoloji gelişmeleri yakalamak mümkündür. Darbe tüplü kriyosoğutucular, düşük titreşim uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen sistemler olmakla birlikte, ileride endüstriyel uygulama alanları açısından ticari etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyeli ortaya çıkartmak adına çalışmalar yürütülebilir.

10. Veri depolama ve veri işlemenin artmaya başlamasıyla birlikte, büyük verilerin depolama ve istenildiği zaman faydalanılma yönünde gelişmeler yaşanmaktadır ve ileride nesnelerin interneti ile birlikte depolanan veri miktarı da artacaktır. Bunun bir sonucu olarak süperbilgisayarlara olan ihtiyacın da artacağı göz önünde bulundurularak şu yorumu yapabiliriz: Süperbilgisayarlar, üstün özellikli işlemci, RAM gibi donanımları bünyesinde bulunduran komplike cihazlardır. Bu donanımlar çalışırken verilerin aşırı artması ile işlem yapmakta zorlanacakları aşıkardır. Donanımlarda yaşanacak bu tip zorlanmalar sonucu ısınma problemleri yaşanacaktır. Bunun için de aşırı düşük sıcaklıklara soğutma sistemleri gerekli olacaktır. Daha önce Tablo 3.1’de verilmiş olduğu gibi, süperbilgisayarlardaki soğutma operasyonlarında rol alan süperiletkenler için kriyojenik soğutma teknikleri kullanıldığı belirtilmişti. Tam bu noktada kriyosoğutucuların daha etkin kullanılmasına dair projeler yürütülerek süperbilgisayarların dayanım eşiğini artırmak üzerine çalışmalar yürütülebilir. Tam da bu sebeple bu alanda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapmak mantıklı bir seçenek olabilir.

7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.)

- Ackermann, R. A., Herd, K. G., Chen, W. E. (1999). Advanced Cryocooler Cooling for MRI Systems. *Cryocoolers 10. ed. Ross, R. G.* (p. 857).
- Akıncıoğlu, S., Gökkaya, H., Uygur, İ. (2015). Sığ ve Derin Kriyojenik İşlem Uygulanmış Karbür Takımların Kesme Kuvvetlerine Etkisi. *International Science and Technology Conference, Doha, Qatar* – December 18-20, 2014: 537–41. Düzce, Türkiye.
- Allen, J. F., Peierls, R., Uddin, M. Z. (1937). *Nature*, vol. 140, pp. 62, 1937.
- Allen J. F., Misener, A. D. (1938). Flow of liquid Helium II. *Nature*, vol. 141, pp. 75, No. 3558, January 8, 1938.
- Andrews, D. E. (1988). Advances in Cryogenic Engineering. Vol.33. ed. R. W. Fast. Springer Science + Business Media, LLC. *Physics Today* (13) (p.799-879). Batavia, USA.
- Atrey, M. D. (2020). Cryocoolers: Theory and Applications Cryocooler Technology: The Path to Invisible and Reliable Cryogenics. Springer International, Mumbai, India.
- Baki, M. (2018). Optimizing Heat Exchanger Parameters of a Joule-Thomson Cryogenic Cooler to Improve the Cooling Performance. Doctoral Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Barron, R. F. (2007). Chapter 5: Advances in Cryogenic Principles. *Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress - Part 3* ed. Reed, R. P., Timmerhaus, K. D. The International Cryogenics Monograph Series, Springer Science+Business Media, LLC, USA.
- Barron, R. F. (2013). Cryogenic Systems: Second Edition. McGraw Hill, Oxford University Press, New York, USA, 506.
- Batey, G., Teleberg, G. (2015). Principles of Dilution Refrigeration: A Brief Technology Guide. Oxford Instruments NanoScience. Oxford Instruments Nanotechnology Tools Limited. United Kingdom.
- Boiarski, M., Brodianski, V., Longworth, R. (1998). Retrospective of Mixed-Refrigerant Technology and Modern Status of Cryocoolers Based on One-Stage, Oil-Lubricated Compressors. *Advances in Cryogenic Engineering Volume 43a*: p.1701-1707.
- Bunkov, Y. M. (2009). Cryogenics and Ultra Low Temperatures. *Physical Methods Instruments and Measurements – Volume III.* ed. Tsipenyuk, Y. M., Eolss Publishers/UNESCO, Oxford, United Kingdom. CRTBT, Grenoble, France.
- Cailletet, L. P. (1885). The Liquefaction of Oxygen. *Science*, 6(128): 51–52.
- Can, F. (2018). Joule-Thomson Tipi Kriyojenik Soğutucularda Akış Kontrol Biriminin Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Center Technical Report (1991). DTRC-91/003, January 1991, pp. 165-176
- Chambers, R., Thomson, T. (1855). A Biographical Dictionary of Eminent Scotsmen in Volumes, Vol. 2, Cullen, UK: *William, Encyclopedia Britannica*, 1855.

- Clauss, R. C. (2008). Chapter 4: Cryogenic Refrigeration Systems. Vol.10. ed. Yuen J. H., MacGregor S. R., Low-Noise Systems in the Deep Space Network (p. 159-192). California, USA.
- Çetin, A., Çiçek, A. (2016). Takım Çeliklerinin Kriyojenik İşlemi. *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science - 3-5 November 2016 Alanya*: 2016, Ankara, Türkiye.
- Çetin, T. H., Kanoğlu, M. (2017). Claude Sıvılaştırma Çevriminin Diferansiyel Evrim Algoritmasıyla Termodinamik Optimizasyonu. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 19-22 Nisan 2017.İzmir. Teskon. Termodinamik Sempozyumu, MMO Yayını
- Dang, H. (2012). Development of High Efficiency Pulse Tube Cryocoolers for Space-borne Infrared Applications. *SPIE Conference Proceedings 8562, The International Society for Optical Engineering* (p. 1-10). Bellingham, Washington, USA.
- Debye, P. (1927). *Ann. Physik* 81, 1154.
- Dietrich, M., Yang, L. W., Thummes, G. (2007). High-Power Stirling-Type Pulse Tube Cryocooler: Observation and Reduction of Regenerator Temperature Inhomogeneities. *Cryogenics* 47: 306-314.
- Dogkas, G., Rogdakis, E. (2018). A Review on Vuilleumier Machines. *Thermal Science and Engineering Progress* 8 (January): 340–354. Athens, Greece.
- Dros, A. A. (1965). Large Capacity Industrial Stirling Machine. *Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 10* (p. 7-12). New York: Plenum Press.
- Duband, L., Charles, I., Duval, J-M., Ercolani, E., Gully, P., Luchier, N., Prouve, T., Thibault, P. (2017). Space cryogenics at CEA-SBT. *Proceedings Volume 10566, International Conference on Space Optics — ICSO 2008; 105660A* (2017). SPIE. Toulouse, France.
- Fereday, J., Bradshaw, T., Crook, M., Orlowska, A. (2006). Cryocooler Modelling Methodology. *Cryogenics* 46 (2-3):183-190.
- Ganni, V., Fesmire, J. (2012). Cryogenics For Superconductors: Refrigeration, Delivery, and Preservation of The Cold. *Advances in Cryogenic Engineering, AIP Conference Proceedings* 1434, 15-27. American Institute of Physics.
- Gantz, C. (2015). Refrigeration: A History. McFarland & Company, Inc. Jefferson, USA.
- Gary, J., Daney, D. E., Radebaugh, R. (1985). A computational model for a regenerator, *Proceedings of 3rd Cryocooler Conference*, NIST Special Publication 698 pp. 199-211.
- Gary, J., Radebaugh, R. (1990). An improved model for calculation of regenerator performance (REGEN3.1), *Proceedings 4th Interagency Meeting on Cryocoolers*, David Taylor Research.
- Giauque, W. F. (1927). A Thermodynamic Treatment of Certain Magnetic Effects. A Proposed Method of Producing Temperatures Considerably Below 1° Absolute. *Journal of the American Chemical Society* 49(8), 1864-70.
- Gifford W. E., Longworth, R. C. (1964). Puls Tube Refrigeration. *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, 86(3), 264–268.

- Golov, A. I., & Vinen, W. F. (2018). Henry Edgar Hall: 28 September 1928 - 4 December 2015. *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 65, 115–132. <https://www.jstor.org/stable/26774165>
- Gorrie, J. (1992). *History and Origins of Cryogenics*, ed. Scurlock, R. G., Clarendon Press, Oxford.
- Hall J. L., Barclay J. A. (1998). Analyzing Magnetic Refrigeration Efficiency: A Rotary AMR — Reverse Brayton Case Study. *Advances in Cryogenic Engineering Volume 43a*: p.1721.
- Haselden, G. G. (1992). The history of liquefied natural gas (LNG). *History and Origins of Cryogenics*, R. G. Scurlock, Ed. Oxford: Clarendon Press, pp. 599-619, UK.
- Herschel, J. (1850). “Making ice”, *The Athenaeum* (January 5), pp. 22, 1850
- <https://advancedtech.airliquide.com/miniature-stirling-cryo-coolers>, [online], (12.11.2021).
- <https://en.vacree.com/repository/image/Rvw8urcXS6mZi2X3knIPLA.png> [online], (07.12.2021).
- <https://indico.cern.ch/event/90787/sessions/113897/attachments/1093421/1559932/Cryo-course-cycles-2010.pdf>, [online], (01.12.2021).
- <https://lob-gmbh.de/en/produkt/wtp-gas-gas-recuperator> [online], (13.12.2021).
- <https://uspas.fnal.gov/materials/10MIT/MIT-Cryo-Eng.shtml>, [online], (01.12.2021).
- <https://www.cryomech.com/cryocoolers/pulse-tube-cryocoolers>, [online], (07.11.2021).
- <https://www.cryomech.com/cryocoolers/gifford-mcmahon-cryocoolers>, [online], (07.11.2021).
- <https://www.cryomech.com/cryocoolers/comparison-chart>, [online], (07.11.2021).
- https://www.globalpiyasa.com/lib/Urun/670/f3cea6b77b2c9ff3790fcf63f3a02f9c_1.jpg, [online], (23.11.2021).
- <https://www.researchandmarkets.com/reports/4773682/cryocooler-market-growth-trends-covid-19>, [online], (20.11.2021).
- <https://www.openpr.com/news/1083585/global-turbo-brayton-cryocoolers-market-forecast-2018-2025-sunpower-brooks-automation-chart-industries-dh-industries.html>, [online], (11.12.2021).
- <https://www.worldofchemicals.com/Article/494/James%20Dewar.jpg>, [online], (13.11.2021).
- Hu, J. Y., Dai, W., Luo, E. C., Wang, X. T., Huang, Y. (2010). Development of High Efficiency Stirling-Type Pulse Tube Cryocoolers. *Cryogenics* 50:603-607.
- IndustryArc Market Research Report (2020): Stirling Cryocoolers Market – Forecast (2021 - 2026).
- Kakaç, S. (2003). *Low Temperature and Cryogenic Refrigeration*, ed. Kakaç, S., Smirnov, H. F., Avelino, M. R., *NATO Science Series II*. Vol 99. Amsterdam, Netherlands: Springer Science + Business Media Dordrecht., New York, p 420.
- Kapitza, P. (1934). The Liquefaction of Helium by an Adiabatic Method. *Proc. Roy. Soc. London*, vol. 147A, pp. 189-211.

- Kapitza, P. (1938). Viscosity of Liquid Helium below the λ -Point. *Nature*, vol. 141, pp. 74.
- Karabuğa, A. (2016). Azot Sıvılaştırma Prosesi Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Isparta, Türkiye.
- Kayan, C. F., Gates, R. G. (1960). Performance Prediction of Low Temperature Air-Cooling Extended Surface by Several Comparative Methods. *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 3, Plenum Press, New York, pp. 325–341.
- Kelley, J. P. (1991). Applications of Cryogenic Technology Vol.10. Springer Science+Business Media, LLC. Virginia, USA p.01–43.
- Kellner, K., Scurlock, R. G. (1971). Cryogenics and Its Applications. *Review of Physics in Technology* 2(1): 25–38.
- Kirk, A. C. (1862). Refrigerating Apparatus. *British patent*, 1,218.
- Kirk, A. C. (1974). Mechanical Production of Cold. *Min. Proc. Inst. Civ. Engrs.*, vol. 37, pp.244–270.
- Klimenko, A. P. (1959). *Proceedings of 10th International Congress. Refrig.*, Copenhagen, Pergamon Press London. United Kingdom.
- Köhler, J. W. L., Jonkers, C. O. (1954). Fundamentals of the Gas Refrigeration Machine. *Philips Tech. Rev.* 16(3), 69-78; and "Construction of the Gas Refrigerating Machine". *Philips Tech. Rev.* 16(5), 105-115.
- Kurti, N., et al. (1956). *Nature* 178, 540.
- Lebrun, Ph. (2007). An Introduction to Cryogenics. *Commission AI "Cryophysics and Cryoengineering" of the IIR, Departmental Report*. Accelerator Technology Department. CERN, Geneva, Switzerland.
- Little, W. A. (1988). Recent Developments in Joule-Thomson Cooling: Gases, Coolers and Compressors. *Proceedings of 5th International Conference on Cryocoolers*. p. 3. Stanford, USA.
- London, H. (1957). *Proceedings International Conference on Low Temperature Physics*, p. 157.
- Matsubara, Y. (1984). Recent Cryocooler Progress in Japan. *National Bureau of Standards Proceedings of 3rd The Cryocooler Conference*, p. 10-19. Tokyo, Japan.
- Matsubara, Y., Gao, J. L. (1994). Novel Configuration of Three-Stage Pulse Tube Refrigerator for Temperatures below 4 K. *Cryogenics* 34 (1994), p.259.
- Mohammed, B. M. (2008). Cryocooler: Theory & Applications. *Department of Physics Faculty of Sciences University of Khartoum*, Master's Thesis, Khartoum, Sudan.
- Mordor Intelligence Market Research Report (2020): Cryocooler Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026).
- Nellis, G., Dolan, F., McCormick, J., Swift, W., Sixsmith, H., Gibbon, J., Castles, S. (1999). Reverse Brayton Coolers for NICMOS. *Cryocoolers 10*. Plenum Publishing Corporation. New York, USA. p. 431-438.

- Nugent, B. T., Johnson W. L., Guzik, M. C., Stephens, J. R. (2021). Space Exploration Applications for Development of High Capacity Cryocoolers. *Cryocoolers 21 - International Cryocooler Conference*: 387–396.
- Onnes, H. K. (1894). On the Cryogenic Laboratory at Leyden and on the Production of Very Low Temperature. *Comm. Phys. Lab.*, Leiden, No. 14. Netherlands.
- Podbielnak, W. J. (1936). Art of Refrigeration, *US Patent Specification*. 2,041,725, patented May 26, 1936
- Radebaugh, R., Siegwarth, J. D. (1971). Dilution Refrigerator Technology. *Cryogenics* 11(5): 368–84.
- Radebaugh, R., Zimmerman, J., Smith, D. R., Louie, B. (1986). A comparison of three types of pulse tube refrigerators: New methods for reaching 60 K, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, Plenum Press, New York. p. 779.
- Radebaugh, R. (1990). A review of pulse tube refrigeration, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 35, Plenum Press, New York. p. 1191.
- Radebaugh, R. (1997). Proceedings of the 16th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Japan, 20-24 May 1996, p.33, Elsevier Science, Oxford.
- Radebaugh, R. (1999-200). Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler*. Proceedings Institute of Refrigeration. Vol. 96. London. pp.11-29.
- Radebaugh, R. (2002). About Cryogenics. *The MacMillan Encyclopedia of Chemistry*, New York, USA.
- Radebaugh, R. (2004). Refrigeration for Superconductors. *Proceedings of the IEEE* Vol.92(10): 1719–34. Boulder, USA.
- Radebaugh, R. (2007). Chapter 1: Historical Summary of Cryogenic Activity Prior to 1950. *Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress - Part 1* ed. Reed, R. P., Timmerhaus, K. D. *The International Cryogenics Monograph Series*, Springer Science+Business Media, LLC, USA.
- Radebaugh, R. (2009). Cryocoolers: The State of The Art and Recent Developments. *Journal of Physics: Condensed Matter* (2009).164219, 21(16).IOP Publishing, Boulder, USA.
- Radebaugh, R., Ross, R. G. (2015). “Cryocooler Fundamentals and Space Applications” CSA Short Course, Cryocoolers and Space Applications. *Cryogenic Engineering Conference*, Tucson, Arizona: 252. USA.
- Radebaugh, R., Bar-Cohen, Y. (2016). Chapter 1: Introduction to Low Temperature Materials and Mechanisms. *Low Temperature Materials and Mechanisms* ed. Ross, R.G., Bar-Cohen Y. (p. 113-187). Boca Raton, USA: CRC Press.
- Radebaugh, R. (2020). Review of Refrigeration Methods. Handbook of Superconducting Materials. 53. Boulder, USA.
- Rawat, V. K. (2015). Theoretical and Experimental Studies on Pulse Tube Refrigerator – A Project Report. National Institute of Technology Rourkela Rourkela, Orissa. India.

- Rawlins, W., Radebaugh, R., Bradley, P. E., Timmerhaus, K. D. (1994). Energy flows in an orifice pulse tube refrigerator, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 39, Plenum Press, New York. pp. 1449-1456.
- Reed, R. P. (2007). Chapter 3: Trends and Advances in Cryogenic Materials. *Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress - Part 2* ed. Reed, R. P., Timmerhaus, K. D. The International Cryogenics Monograph Series, Springer Science+Business Media, LLC, USA.
- Ross, R. G. (2016). Chapter 6: Refrigeration Systems for Achieving Cryogenic Temperatures. *Low Temperature Materials and Mechanisms* ed. Ross, R. G., Bar-Cohen, Y. (p. 113-187). Boca Raton, USA: CRC Press.
- Penswick, L., Olan, R. W., Williford, I., Drancey, S., Buchholz, G. (2014). High-Capacity and Efficiency Stirling Cycle Cryocooler. *Cryocoolers 18* (p. 155-162). Boulder: ICC Press.
- Perinić, G., Vandoni, G., Niinikoski, T. (2005). "Introduction to Cryogenic Engineering" - Training Lectures. CERN. Geneva, Switzerland.
- Petrivelli, A. (2002). The ESA laboratory support equipment for the ISS. *ESA Bulletin (0376-4265)*, (109): 35.
- Punit, K., Ravi, S., Bisht, V. S., Kumar. S. (2017). Cryogenics: A Brief Review. 8(10): 67–70.
- Saka, Z. (2019). Süperkritik Karbondioksit Akışkan Ortamında (Susuz) Pamuğun Hidrofilileştirilmesi ve Ağartılması. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi. Bursa, Türkiye.
- Scott, R. B. (1959). *Cryogenic Engineering*, D. Van Nostrand Company, Princeton, New Jersey, USA.
- Scurlock, R. G. (1992). *History and Origins of Cryogenics*. Oxford: Clarendon Press.
- Shirron, P. J. (2014). Applications of the Magnetocaloric Effect in Single-Stage, Multi-Stage and Continuous Adiabatic Demagnetization Refrigerators. *Cryogenics 62*: 130–39. USA.
- Shirron, P. J., DiPirro, M., Johnson, D. L. (2009). Cryogenic Technology for CMB-Pol : Sub-Kelvin Cooling. *Journal of Physics: Conference Series 155 (2009)*. Technology Development for a CMB Probe of Inflation. IOP Publishing
- Shoenberg, D. (1971). Heinz London, 1907-1970. *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*. Vol.17. November, 1971. The Royal Society Publishing
- Siemens, C. W. (1992). *History and Origins of Cryogenics*, ed. Scurlock, R. G., Clarendon Press, Oxford.
- Sobol, S., Grossman, G., Sofer, T. (2015). Linear Resonance Compressor for Stirling-Type Cryocoolers Activated by Piezoelectric Stack-Type Elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 101(1): 331–40. Haifa, Israel.
- Stirling, R. (1817). Improvements for diminishing the consumption of fuel and in particular, an engine capable of being applied to the moving of machines on a principle entirely new. *British Patent No. 4081*. Britain.

- Storch, P. J., Radebaugh, R. (1988). Development and experimental test of an analytical model of the orifice pulse tube refrigerator, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 33, Plenum Press, New York. pp. 851-859.
- Storch, P. J., Radebaugh, R., Zimmerman, J. E. (1990). Analytical Model for the Refrigeration Power of the Orifice Pulse Tube Refrigerator, *NIST Technical Note* 1343.
- Strobridge, T. R. (1974). Cryogenic Refrigerators – An Updated Survey. NBS Technical Note 655. National Bureau of Standards, Washington, USA
- Swift, G. W. (1988). Thermoacoustic engines, *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 1145-1180.
- Taban, E., Kaluç, E. (2011). Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) Depolanmasında Kullanılan %9 Ni İçeren Çelikler ve Kaynak Edilebilirlikleri. *Mühendis ve Makina*, 53(624), 60-67. Türkiye.
- Tanaeva, I. A., de Waele, A. T. A. M. (2005). A Small Helium-3 Puls-Tube Refrigerator. *Cryogenics* 45, 578.
- Tanchon, J., Lacapere, J., Molyneaux, A., Harris, M., Hill, S., Abu-Sharkh, S. M., Tirolien T. (2016). A Turbo-Brayton Cryocooler for Future European Observation Satellite Generation. *International Cryocooler Conference Vol.19 ed: Miller, S. D., Ross, R. G.*:437–46. Boulder, USA.
- ter Brake, H. J. M., Wiegerinck, G. F. M. (2002). Low-Power Cryocooler Survey. *Cryogenics* 42, 705.
- Thirumaleshwar, M., Subramanyam, S. V. (1986). Cryogenic Refrigeration Methods For Low And Ultra-Low Temperatures - A Review. *Sādhanā, Vol. 9, Part 3*: 191-232, Bangalore, India.
- Timmerhaus, K. D. (2007). Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress. ed. Reed, R. P., Timmerhaus, K. D. *The International Cryogenics Monograph Series*, Springer Science+Business Media, LLC, USA.
- Tominaga, A. (1993). Basic notion of thermoacoustic theory and some results of simulations, *Proceedings of 4th Joint Sino-Japanese Seminar on Cryocoolers and Concerned Topics, Chinese Academy of Sciences*. p. 79.
- Tong Z., Changzhao, P., Liubiao, C., Wenxiu Z., Yuan, Z. Junjie, W. (2017). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 171 012077.
- Twerenbold, D. (1996). Cryogenic Particle Detectors. *Reports on Progress in Physics* 59 (1996): 349–426. UK, Neuchâtel, Switzerland.
- Tzabar, N. (2014). Joule-Thomson Cryocoolers Operating with Binary Mixtures. *Cryocoolers 18 - International Cryocooler Conference*: 389–396. Haifa, Israel.
- Uhlig, K. (2002). $^3\text{He}/^4\text{He}$ Dilution Refrigerator with Pulse Tube Refrigerator Precooling. *Cryogenics* 2002;42(2):73–7, Germany.
- Uhlig, K. (2015). Dry Dilution Refrigerator with ^4He -1 K-Loop. *Cryogenics* 66: 6–12. Germany.
- Ventura, G., Risegari, L. (2007). The Art of Cryogenics: Low-Temperature Experimental Techniques. 1st Edition. Elsevier Science Ltd.
- Vilches, O. (2019). Development of He_3/He_4 Dilution Fridges. *Published on Department of Physics, CENPA, University of Washington*. USA

- Walker, G. (1983). Cryocoolers. Part 1: Fundamentals. ed. Timmerhaus, K. D., Clark, A. F., Olsen, J. L., Calgary, Kanada: Springer, Boston, MA.
- Walker, G. (1983). Cryocoolers. Part 2: Applications. ed. Timmerhaus, K. D., Clark, A. F., Olsen, J. L., Calgary, Kanada: Springer, Boston, MA.
- Wang, X., Zhang, Y., Li, H., Dai, W., Chen, S., Lei, G., Luo, E. (2015). A High Efficiency Hybrid Stirling-Pulse Tube Cryocooler. *AIP Advances* 5:037127.
- Wang, J., Pan, C., Zhang, T., Luo, K. Q., Xi, X. T., Chen, L. B., Zhou, Y., Wang, J. J. (2020). Progress of the 4 K-class Vuilleumier type cryocooler and its further applications. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering* 755(1).
- Weisend, J. G. (2012). Stirling and Gifford-McMahon Cryocoolers - Cryogenic Society of America. *Cold Facts Winter (2012) - Cold Facts Series of Defining Cryogenics*. USA.
- Weisend, J. G. (2018). Stirling and Gifford-McMahon Cryocoolers - Cryogenic Society of America. *Cold Facts Vol.34(2) - Cold Facts Series of Defining Cryogenics*. USA.
- Weisend, J. G. (1998). Handbook of Cryogenic Engineering Vol II. Philadelphia: Taylor & Francis, CRC Press, USA.
- Xiao, J. H. (1993). Thermoacoustic theory for regenerative cryocoolers: A case study for a pulse tube refrigerator, *Proceedings of 7th International Cryocooler Conference*, Air Force Report PL-CP-93-1001 p. 305.
- Xiao, J. H. (1995). Thermoacoustic heat transportation and energy transformation, Part 1: Formulation of the problem, *Cryogenics* 35, 15; Part 2: Isothermal wall thermoacoustic effects, *Cryogenics* 35, 21; Part 3: Adiabatic wall thermoacoustic effects, *Cryogenics* 35, 27.
- Yi, S., Yuan, W. K. (2015). Tactical Cryocooler Vendor Survey: 2015. Aerospace Report No. TOR-2015-02442.
- Zaragola, M. V., McCormick, J. A. (2006). High-Capacity Turbo-Brayton Cryocoolers For Space Applications. *Cryogenics* Vol. 46, 2006: 169-175.
- Zagarola, M. V., McCormick, J. A., Cragin, K. J. (2013). Demonstration of an Ultra-Miniature Turboalternator for Space-Borne Turbo-Brayton Cryocooler. *Cryocoolers 17*, ICC Press, Boulder, USA. p. 453-460.
- Zare, K. B. (2016). Cryogenic. International Journal of Science, Engineering and Management (IJSEM) Vol 1, Issue 8, December 2016. Pune, India.
- Zhao, Z., Wang, C. (2019). Cryogenic Engineering and Technologies: Principles and Applications of Cryogen-Free Systems. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.
- Zhu, S. W., Wu, P. Y., Chen, Z. Q. (1990). Double Inlet Pulse Tube Refrigerators: An Important Improvement. *ICEC 13 Proceedings, Cryocoolers Vol.30*. p. 514-520.
- Zhu, S. W., Wu, P. Y., Chen, Z. Q. (1990). A Single Stage Double Inlet Pulse Tube Refrigerator Capable of Reaching 42 K. *ICEC 13 Proceedings, Cryocoolers Vol.30*. p. 257-261.
- Zhu, S. W., Zhou, S. L., Yoshimura, N., Matsubara, Y. (1997). Phase Shift Effect of the Long Neck Tube for the Pulse Tube Refrigerator. *Cryocoolers 9*. ed. Ross, R. G. Plenum Press. New York, USA. p. 269.

Zu, H., Dai, W., de Waele, A.T.A.M. (2021). Development of dilution refrigerators—A review. *Cryogenics*, Vol.121 (2022):103390. China.

Zindani, D., Kumar, K. (2020). A Brief Review on Cryogenics in Machining Process. *SN Applied Sciences* 2(6): 1–10. Springer Nature Switzerland AG. Ranchi, India.

