

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KRİYOJENİK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE TERMOELEKTRİK JENERATÖR
UYGULAMASI VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Anıl ÜNSAÇ**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

MAYIS 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KRİYOJENİK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE TERMOELEKTRİK JENERATÖR
UYGULAMASI VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Anıl ÜNSAÇ
(301071004)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Mayıs 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cenap Ş. ÖZBEN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)

MAYIS 2010

ÖNSÖZ

Dünyamızın enerji ihtiyacı her geçen yıl artmaktayken, enerji üretiminin %80'nin karşılandığı fosil yakıtların ömrü ise gün geçtikçe azalmaktadır. Yenilenebilir enerji ile üretilen elektrik enerjisinin de depolanmasında sıkıntılar yaşanmaktadır. Enerji depolama teknolojilerinin gelişimi, yenilenebilir enerji kaynakları kadar önemlidir. Fakat yeni enerji depolama teknolojileri geliştirilirken, enerji verimi ve yoğunluğunun yanında, çevre unsurları da dikkate alınmalıdır. Bu tez çalışmasıyla sonuca bir adım daha yaklaşılacak sıvı azot enerji yedekleme projesinin başarıyla sonuçlanıp, dünyaya çevreci bir enerji depolama teknolojisi sunulabilmesini umut ederim.

Tez süresince her aşamada maddi manevi desteğini ve yardımını esirgemeyen, başta değerli tez danışmanım sayın Prof. Dr. Altuğ Şişman'a ve diğer hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2009

Anıl ÜNSAÇ
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
SEMBOLLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Enerji Depolamasının Önemi ve Yeni Yöntemler	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Literatür Özeti	4
1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Sonuçlar	5
2. TEMEL BİLGİLER.....	9
2.1 Kriyojenik Akışkanlar ve Temel Özellikleri.....	9
2.1.1 Gazların özgül ısıları	9
2.1.2 Sıvıların özgül ısıları	12
2.1.3 Gazların termal iletkenliği	13
2.1.4 Sıvıların termal iletkenliği	15
2.2 Azotun Termodinamik ve Transport Özellikleri.....	15
2.3 Kriyojenik Isı Transferi	20
2.3.1 Kriyojenik evaporasyon.....	21
2.3.2 Kanatçıklı yüzeylerde ısı iletimi	24
2.3.3 Kriyojenik sıcaklıklarda buzlanma özellikleri	25
2.4 Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Jeneratörler.....	26
2.4.1 Seebeck etkisi.....	27
2.4.2 Peltier etkisi.....	28
2.4.3 Thomson etkisi	29
2.4.4 Termoelektrik Bağlıntılar.....	30
2.4.5 Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanım Alanları.....	34
2.4.6 Enerji Depolama Teknolojileri.....	40
2.4.6.1 Sistem derecelendirmeleri	41
2.4.6.2 Boyut ve ağırlık	42
2.4.6.3 İlk yatırım maliyeti	42
2.4.6.4 Ömür Verimi	43
2.4.6.5 Birim çevrimin maliyeti	44
3. KRİYOJENİK DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI.....	45
3.1 Kriyojenik Isı Değiştiricisinin Özellikleri	45
3.2 Kanatçıklı Yüzeyin Parametreleri	48
3.3 Termoelektrik Jeneratörlerin Özellikleri	50

3.3.1 Deneysel Ölçüm Sistemi	52
4. HZ-20 TERMOELEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU	67
4.1 Deney Düzeneginin Tasarımı	67
4.2 HZ-20 Modül Deneyinin Voltaj – Akım Grafikleri.....	72
4.3 HZ-20 Modül Deneyinin Güç – Akım Grafikleri.....	74
4.4 HZ-20 Modül Deneyinin Gerilim – Yük Direnci Grafikleri	76
4.5 HZ-20 Modül Deneyinin Güç – Yük Direnci Grafikleri.....	77
4.6 HZ-20 Modül Deneyinin İç Direnç – Ortalama Sıcaklık Grafiği.....	80
4.7 HZ 20 Modül Deneyinin Seebeck Katsayısı - Ortalama Sıcaklık Grafiği	82
4.8 HZ-20 Modül Deneyinin Maksimum Güç – Ortalama Sıcaklık Grafiği	83
5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI	85
KAYNAKLAR.....	87

KISALTMALAR

LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
TIG	: Tungsten Soy Gaz Kaynağı
TEG	: Termoelektrik Jeneratör
RTG	: Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör
ATEG	: Otomotiv Termoelektrik Jeneratörü
NI	: National Instruments

SEMBOLLER

C_v	: Sabit Hacimdeki Özgül Isı
C_p	: Sabit Basıncıdaki Özgül Isı
T	: Sıcaklık
P	: Basıncı
R	: Gaz Sabiti
	: İletken Elektriksel Direnci
h	: Planck Sabiti (6.625×10^{-34} J-s)
	: Entalpi
I	: Molekülün Atalet Momenti
	: Akım
J	: Akım
k	: Boltzmann Sabiti
	: Termal İletkenlik
q	: Elektriksel Yük
Q	: Isı
N	: Molekül Sayısı
N_0	: Avogadro Sayısı (6.0221×10^{23} 1/mol)
v	: Ortalama Molekül Hızı
v_a	: Sonik Hız
g_c	: Newton Yasasında Birim Dönüşüm Faktörü
M	: Molekül Ağırlığı
s	: Entropi
S	: Seebeck Katsayısı
t	: Zaman
Z	: Termoelektrik Malzemenin Performans Kriteri
Pr	: Prandtl Sayısı
β_t	: Termal Genleşme Katsayısı
f	: Molekülün Serbestlik Derecesi
Θ_R	: Karakteristik Rotasyon Sıcaklığı
ρ	: Yoğunluk
μ	: Dinamik Viskozite
	: Thomson Katsayısı
λ	: Molekül Arası Mesafe
γ	: Özgül Isılar Oranı, c_p/c_v
δ	: Kalınlık
α	: Seebeck Katsayısı
Π	: Peltier Katsayısı
η	: Verim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çok düşük basınç ve 300 K sıcaklıkta ideal gazların özgül ısıları.	10
Çizelge 2.2 : 1 atm'deki hidrojen gazının özgül ısısı.	12
Çizelge 2.3 : 101.3 kPa basınç altında bazı kriyojenlerin termal ve transport özellikleri.	12
Çizelge 2.4 : Atmosferik basınçta bazı kriyojenik gazların termal iletkenlik katsayıları.	14
Çizelge 2.5 : Sıvı azotun termal ve transport özellikleri.	16
Çizelge 2.6 : Gaz azotun termal ve transport özellikleri.	16
Çizelge 2.7 : Kriyojenik sıcaklıklarda H ₂ O buzunun termal iletkenlik katsayısı.	26
Çizelge 2.8 : Bazı malzemelerin Platinyum referansında 0°C'deki Seebeck değerleri.	28
Çizelge 2.9 : Enerji depolama teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları.	40
Çizelge 3.1 : Isı değiştiricisinin özellikleri.	47
Çizelge 3.2 : HZ-20 termoelektrik modülünün özellikleri.	51
Çizelge 3.3 : Depronun özellikleri.	53
Çizelge 3.4 : Kapton® 100 HN Film 25 µm (1 mil) malzemesinin özellikleri.	54
Çizelge 3.5 : PT 100 elemanın sıcaklığa bağlı direnç fonksiyonu.	60
Çizelge 4.1 : Farklı Deney Durumları için Grafik verileri	72
Çizelge 4.2 : Farklı Deney Durumları için Karakteristik veriler.	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki özgül ısı – sıcaklık grafiği.	17
Şekil 2.2 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entropi – sıcaklık grafiği.....	17
Şekil 2.3 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entalpi – sıcaklık grafiği.	18
Şekil 2.4 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki termal iletkenlik – sıcaklık grafiği.	18
Şekil 2.5 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki dinamik viskozite – sıcaklık grafiği.	19
Şekil 2.6 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entalpi – entropi grafiği.	19
Şekil 2.7 : a) Atmosferik azot evaporatörü, b) Evaporatör profili.	21
Şekil 2.8 : Evaporatör üzerinde buzlanma oluşumu.....	22
Şekil 2.9 : a) Buharlı evaporatör, b) Elektrikli evaporatör.....	23
Şekil 2.10 : Termoelektrik jeneratör şeması.	30
Şekil 2.11 : Gaz lambası jeneratörü.....	34
Şekil 2.12 : Jeotermal enerji ile termoelektrik jeneratör uygulaması.....	35
Şekil 2.13 : Vücut ısıyla Li-Po pil şarj eden bir termoelektrik uygulaması.	36
Şekil 2.14 : Sıcak egzost gazlarından TEG ile enerji üretimi.	37
Şekil 2.15 : Yanma odalı sıcak TEG uygulaması	37
Şekil 2.16 : RTG uygulamaları.	38
Şekil 2.17 : Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG ünitesi.....	38
Şekil 2.18 : Otomotivde termoelektrik uygulamaları.	39
Şekil 2.19 : Enerji depolama teknolojilerinin deşarj süresi – güç grafiği.....	41
Şekil 2.20 : Enerji depolama teknolojilerinin enerji yoğunlukları.	42
Şekil 2.21 : Enerji depolama teknolojilerinin maliyet grafiği.....	43
Şekil 2.22 : Enerji depolama teknolojilerinin verim – çevrim ömür grafiği.....	44
Şekil 2.23 : Enerji depolama teknolojilerinin çevrim maliyet grafiği.	44
Şekil 3.1 : Isı değiştirici parçalarının ölçüleri.	45
Şekil 3.2 : Isı değiştiricisinin montaj görünümü.	46
Şekil 3.3 : Paslanmaz ısı değiştiricisi.	47
Şekil 3.4 : Kanatçıklı yüzeyin ölçüleri.	48
Şekil 3.5 : Kanatçıklı yüzey.	49
Şekil 3.6 : Natsink programından bir görüntü.....	49
Şekil 3.7 : Termoelektrik modülün görüntüsü ve ölçüleri.	50
Şekil 3.8 : Deney düzeneği teorik montaj modeli.	52
Şekil 3.9 : Depron polistren köpük.....	53
Şekil 3.10 : Kapton Filmi.....	54
Şekil 3.11 : Bozuk yüzey görünümü ve silikon ısı pastası.	55
Şekil 3.12 : İzolasyonlu kanatçıklı yüzey.	56
Şekil 3.13 : Termoelektrik modüllerin ısı pastalanışı.....	56
Şekil 3.14 : TEG'lerin numaralandırılışı.	57
Şekil 3.15 : Bir yüzün montajı bitmiş görüntüsü.	57
Şekil 3.16 : Deney düzeneğinin bir termoelektrik alanındaki katmanları.	58
Şekil 3.17 : Sıcaklık sensörlü yüzün montaj görüntüsü.....	59

Şekil 3.18 : PT 100 elemanı	59
Şekil 3.19 : Matematica programında fonksiyon çözümü.....	60
Şekil 3.20 : Tam çözümle kısaltılmış çözümün T-R grafiği	61
Şekil 3.21 : National Instruments BNC-2210 veri toplama bloğu.....	61
Şekil 3.22 : PT 100 direncinin okunabilmesi için oluşturulan devre şeması.	62
Şekil 3.23 : Direnç bağlantıları ve koaksiyel kabloların veri bloğuna girişi.	62
Şekil 3.24 : PT 100 yerleştirilme noktaları.....	63
Şekil 3.25 : Isı değiştiricisinin ısı pastalanışı.	64
Şekil 3.26 : Montaj edilmiş deney düzeneği.	64
Şekil 3.27 : Alicat Scientific gaz debi ölçer.	65
Şekil 3.28 : Elektro-Atomatik firmasının 9080-200 elektronik yükü.	65
Şekil 3.29 : Fan ilaveli deney düzeneği.....	66
Şekil 4.1 : Variak trafo ve devar kabı.	67
Şekil 4.2 : Bakır ısıtıcı ve paslanmaz fişekler.	68
Şekil 4.3 : Bakır ısıtıcı ve paslanmaz fişekler.	68
Şekil 4.4 : Modül altı ve üstü bakır plakalar.	69
Şekil 4.5 : Lutron marka termometre.	69
Şekil 4.6 : Deney düzeneği.	70
Şekil 4.7 : Deney düzeneğinin şematik görünüşü.	71
Şekil 4.8 : Elektro-Atomatik marka dijital yük ve Fluke marka avometre.	71
Şekil 4.9 : 1. Gerilim – Akım grafiği.	73
Şekil 4.10 : 2. Gerilim – Akım grafiği	73
Şekil 4.11 : 3. Gerilim – Akım grafiği.	74
Şekil 4.12 : 1. Güç – Akım grafiği.....	74
Şekil 4.13 : 2. Güç – Akım grafiği.....	75
Şekil 4.14 : 3. Güç – Akım grafiği.....	75
Şekil 4.15 : 1. Gerilim – Yük Direnci grafiği.	76
Şekil 4.16 : 2. Gerilim – Yük Direnci grafiği.	76
Şekil 4.17 : 3. Gerilim – Yük Direnci grafiği.	77
Şekil 4.18 : 1. Güç – Yük Direnci grafiği.	78
Şekil 4.19 : 2. Güç – Yük Direnci grafiği.	78
Şekil 4.20 : 3. Güç – Yük Direnci grafiği.	79
Şekil 4.21 : İç Direnç – Ortalama Sıcaklık grafiği.....	81
Şekil 4.22 : Seebeck Katsayısı – Ortalama Sıcaklık grafiği.....	82
Şekil 4.23 : Maksimum Güç – Ortalama Sıcaklık grafiği.	83

KRİYOJENİK ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE TERMOELEKTRİK JENERATÖR UYGULAMASI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Dünyamızın enerji ihtiyacı her geçen yıl artmaktayken, enerji üretiminin %80'nin karşılandığı fosil yakıtların ömrü gün geçtikçe azalmaktadır. Yenilenebilir enerjiye yönelim kaçınılmaz hale gelse de emre amade olmadıkları için tam anlamıyla güven vermemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan güvenin artması enerji depolama teknolojilerinin gelişimine bağlıdır. Güç kalitesi ve enerji yönetimi konusunda enerji depolama sistemleri üzerine tüm dünyada birçok çalışma yapılmaktadır. Günümüzün popüler enerji depolama teknolojileri ise genelde enerji yoğunlukları düşük, çevreye zararlı ünitelerdir. Sıvı azot enerji yedekleme sisteminin kimyasal patlama tehlikesi, zehirli gaz emisyonu, zehirli atık veya düşük frekanslı elektromanyetik alan emisyonu olmadığı için yeni enerji depolama teknolojileri arasında büyük potansiyele sahip olduğu aşikardır.

Bu tez, düşük emisyonlu ve enerji yoğunluğu yüksek bir enerji depolama teknolojisi geliştirmeyi hedefleyen projenin bir ön çalışması niteliğindedir. Projenin esası, yenilenebilir veya başka bir kaynaktan alınan enerji ile yoğunlaştırılan azot içerisinde bu enerjinin depolanıp, talep neticesinde sıvı azot atmosferik buharlaştırıcı ile gaz fazına geçirilip, kinetik enerjisinin bir mikro gaz türbiniyle elektrik enerjisine dönüşümünü sağlamaktır.

Bu çalışmada, sıvı azotta enerji yedeklenmesi projesinde, talep neticesinde azotun atmosferik buharlaştırıcı ile gaz fazına geçirilmesi sırasında boşa giden soğuk ekserjinin, termoelektrik jeneratörler ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi için ön çalışma olarak, öncelikle bir termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklardaki temel karakteristik özellikleri deneysel olarak çıkartılmış ve kriyojenik şartlarda termoelektrik jeneratör üzerinden alınacak gerilim ve güç değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında ise mevcut bir kriyojenik ısı değiştiricisi üzerinde termoelektrik jeneratör uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Çalışma başarıya ulaşırsa sıvı azotta enerji yedekleme teknolojisinin enerji yoğunluğu ve verimi arttırılacağı gibi, sıvılaştırılmış doğalgazın buharlaştırılması gibi işlemler sırasında boşa giden soğuk ekserjinin değerlendirilmesine öncülük edilmiş olunacaktır.

APPLICATION AND CHARACTERIZATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS ON A CRYOGENIC HEAT EXCHANGER

SUMMARY

While the energy demand of our world is increasing annually, the remaining life of fossil fuels, which provides 80 percent of world energy output, is decreasing day by day. Although it is unavoidable to lean to renewable energy, it does not assure properly because of having low availability. The confidence in renewable energy is based on the development of the energy storage technologies. There are many studies on the energy storage issue in the matter of power quality and energy management. However, the popular energy storage units of our day are generally harmful to environment and have low energy density. It is very clear that liquid nitrogen energy storage system has great potential in comparison with new energy storage technologies because of having no danger of chemical explosions, poisonous gas emission, toxic by-products, or low-frequency electromagnetic field emissions.

This thesis is a preliminary study of a project that aims developing a high-energy storage technology that has low emission and high energy density. The purpose of the project is to store an energy that is supplied from a renewable or another energy source, in liquid nitrogen by condensing it with this energy, and furthermore if there is any demand, to vaporize the liquid nitrogen with an atmospheric evaporator and to convert its kinetic energy to the electrical energy with an micro gas turbine.

Main subject of this thesis is calculating the basic characteristic properties of a thermoelectric generator module experimentally at cryogenic temperatures. An application of thermoelectric generators on a existing cryogenic heat exchanger is also processed.

If the study succeeds, the energy density and efficiency of liquid nitrogen energy storage system will be increased, and furthermore, it will pioneer to the utilization of the cold exergy that is wasted during the processes like vaporizing of the liquefied natural gas.

1. GİRİŞ

1.1 Enerji Depolamasının Önemi ve Yeni Yöntemler

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık olarak %4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılamakta olan fosil yakıt rezervi ise çok daha hızlı bir şekilde tükenmektedir. Şu anki enerji kullanım koşulları göz önüne alınarak yapılan en iyimser tahminlerde bile en geç 2100 yılında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceği ve ihtiyacı karşılayamayacağı görünmektedir. Doğalgaz için şu anki rezervlerle yaklaşık 100-120 yıl, kömür içinse yine yaklaşık 180-200 yıllık bir kullanım süresi tahmin edilmektedir.

Ayrıca fosil yakıtların kullanımı dünya ortalama sıcaklığını da son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştırmış, yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyonlarca dolar zarara yol açan sel ve fırtına gibi doğal afetlerin gözle görülür biçimde artmasına sebep olmuştur.

Fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan yanma ürünleri atmosfere bırakılmakta ve atmosfer içerisinde birikmektedir. Fotosentez, çürüme gibi tabii dönüşümler bu birikime engel olabilse de, aşırı yakıt tüketimi kısa süreli bir birikime neden olmaktadır. Atmosfer içinde biriken yanma gazları güneş ve yer arasında tabii olmayan katman meydana getirmekte, insan ve bitki hayatı üzerinde negatif etkiye neden olmaktadır. Sera etkisi, ısı enerjisinin karbondioksit gibi gazlar tarafından emilip atmosferde alıkonmasıyla ortaya çıkan ısı artışı, olarak da bilinen bu etki ve insan sağlığı bugün önemle üzerinde durulan olgulardır.

Nükleer enerji de, sera gazı salınımı olmasa da, herhangi bir kaza veya hata sonucunda tehlikenin büyük oluşu nedeniyle halk tarafından istenmemektedir. Dünyanın karşılaştığı bu problemlerden dolayı bilim adamları ve mühendisler çevreye zararı olmayan ve tükenmeyecek farklı enerjiler kullanılması yoluyla güç üretmeye çalışmaktadırlar. Rüzgar, güneş, hidroenerji ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar bu nedenle çok rağbet görmektedir.

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretildiğinde ise karşımıza bir başka problem çıkar. Kaynak emre amade olmadığı için, talepten fazla enerji üretildiğinde, bu fazla enerjinin kaybedilmemesi için depolanması gerekmektedir. Örneğin hidroelektrik santrallerinde üretilen fazla enerjinin depolanma imkanı olsa enerjinin sorunun çoğu çözülmektedir. Rüzgar enerjisinin bol olduğu kış aylarında ve güneş enerjisinden bol yararlanabilinen yaz aylarında bu yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisinin kullanım fazlasının depolanması gerekmektedir. Fakat elektrik enerjisinin depolanması karmaşık teknolojiler gerektirir. Yenilenebilir enerjiye talep arttıkça, enerji depolanması ile ilgili çalışmalar da hız kazanmaktadır. Başta İngiltere olmak üzere, enerji depolanması konusundaki çalışmalara büyük destekler verilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan aküler, kimyasal tabanlı oluşu ve birim hacimde depolanabilen enerji miktarının düşüklüğünden dolayı hem yüksek miktarda enerji depolama hem de güç kalitesi için hidrojen, basınçlı hava, volan ve pompalanmış su gibi alternatiflerin yanında kriyojenlerde enerji depolanması da incelenmektedir.

Çalıştığı ortalama sıcaklık -150°C 'ın altında olan sistemlere kriyojenik sistemler, buharlaşma sıcaklıkları bu değerin altında olan akışkanlara da kriyojenik akışkan ya da kriyojen adı verilir. LNG kullanılan tesislerde rezerv tankı içerisinde metan, inert gaz gereken bazı sistemlerde tank içerisinde azot, hastanelerdeki solunum tüpleri içerisinde oksijen, TIG kaynaklarında tüpün içinde argon sıvı halde bulunur, bunlar günlük hayatta rahatlıkla karşılaşılabilecek kriyojenlerdir.

Enerji sorununun bir başka çözümü ise enerjinin verimli kullanımınıdır. Tesislerdeki atık ısıların değerlendirilmesi de enerjinin verimli kullanımının başlıca yollarındandır. Termoelektrik jeneratörler, atık ısının değerlendirilmesinde kullanılan bir elemandır. Bu elemanlar, iki yüzü arasında sıcaklık farkı oluşturulduğu anda üzerinden akan ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Atık ısı olan bölgeye yerleştirilen termoelektrik jeneratörlerin soğuk yüzüne de dış ortamla ısı transfer yüzey alanını arttıran kanatçıklı yüzeyler konulduğunda, bu bölgeden kaybedilen atık ısı direkt olarak elektrik enerjisine çevrilmiş olur.

TEG (termoelektrik jeneratör) modülleriyle; ısıtıcı, ocak, su ısıtıcısı, barbekü, otomobil iç kabin ısıtıcısı gibi ısı kaynaklarından istenildiğinde direk olarak elektrik üretilebilir. Enerji tesisleri, çimento fabrikaları, rafineriler, cam üretim tesisleri, dökümhane gibi tesislerdeki yüksek miktardaki atık ısının geri dönüşümünde, biyogaz ve rafinerilerdeki atık gazların yakıldığı flare adı verilen bacalardaki atık ısılarından elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. TEG'i odun ocaklarında, insineratörlerde, solar tuz havuzlarında, jeotermal ve güneş odaklayıcılarda kullanılarak yenilebilir enerji kaynaklarından direkt olarak elektrik enerjisi üretimi sağlanıp; sıfır emisyonlu, sessiz ve güvenilir sistemler kurulabilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma, sıvı azotta enerji depolanması hedeflenen projedeki bölümlerden biri olan termoelektrik modüllü kriyojenik ısı değiştiricisinin tasarımı için bir ön çalışma olarak düşünülmüştür. Projedeki hedef, enerji yedeklemesi gereken bölgede, yenilenebilir veya diğer kaynaklardan elde edilen enerji ile hava içerisindeki azotun sıvılaştırılarak depolanması, enerji ihtiyacı dahilinde de tank içerisindeki sıvı azotun buharlaştırılarak mikro türbin vasıtasıyla enerji üretilmesidir. Bu sistemde çevreye atık ısı atılmasa da sıvı azotun buharlaştırılması sırasında çevreden atık ısı soğrulmaktadır. Eğer sıvı azotun buharlaştırılması sırasında atmosferik buharlaştırıcı üzerine termoelektrik jeneratörler yerleştirilirse, sadece evaporator boyutları büyütülerek buharlaştırma için geçen ısıdan elektrik enerjisi üretilebilir. Böylelikle sıvı azotla enerji depolama projesinin verimi artmış olacaktır.

Bu amaç doğrultusunda, öncelikle bir termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklardaki Seebeck katsayısı, iç direnci, voltaj akım gibi temel karakteristiklerini deneysel olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlere dayanılarak kullanılan termoelektrik modüllerin verilen bir sıcaklık aralığında ne kadar güç üretilebileceği daha gerçekçi bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Uygulama safhasında ise sıvı azotun buharlaştırılması sırasındaki çevreden ısı değiştiricisine geçen ısıdan elektrik enerjisi üretebilecek termoelektrik modüllü bir kriyojenik evaporatör için, laboratuvar ölçekli bir ısı değiştiricisi üzerinde yapılan tasarım çalışmalarına yer verilmiştir.

1.3 Literatür Özeti

Termoelektrik jeneratörler ve kriyojenik ısı değiştiricileri hakkında literatürde birçok çalışma olsa da iki konunun iç içe işlendiği, kriyojenik sıcaklıklarda termoelektrik uygulamaları, üzerine çok sayıda çalışma yapılmamış, kısmen bakir bir konudur. Bu tez çalışması sırasında yapılan literatür taramasında incelenen makale ve çalışmaların özetine bu bölümde değinilmiştir.

Wei Sun ve diğ., bu tezde yapılan benzer bir çalışma yapmışlardır. LNG tanklarında kriyojenik sıcaklıktaki metan kullanım için buharlaştırıldığında, sistemin soğuk ekserjisi boşa gitmektedir. Çalışmada bu buharlaştırma sırasında kriyojenik ısı değiştiricisi üzerinde yerleştirilen termoelektrik jeneratörlerle, atık ısı olarak nitelendirilebilecek ısının geri kazanılıp elektrik enerjisi üretilmesi hedeflenmiştir. Termoelektrik jeneratörde p tipi olarak $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ alaşım, n tipi için ise $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ alaşımını kullanılmış, 160 K sıcaklık farkında %9 verimle ısıl enerji elektrik enerjisine doğrudan dönüştürülmüştür. [11]

C.A. Ordonez ve M.C. Plummer tarafından yapılan çalışmada elektrokimyasal pillere alternatif olarak kriyojenik ortamlarda depolanan soğuk ekserji ile çalışan kriyojenik ısı makineleri için materyaller araştırılmıştır. Araştırmada hidrojen, helyum, neon ve nitrojen gibi düşük kütleli gazların soğuk rezervuar materyali olarak kullanıldığında yüksek özgül iş değerleri elde edildiği görülmüştür. Bunlardan güvenlik ve çevre kaygıları en az olan, atmosferin %78'ini oluşturan azotun kriyojenik enerji yedeklemesinde kullanıldığında 0.75 MJ/kg'lık özgül iş ve 67 cent/MJ maliyet değeri ile 0.72 MJ/kg özgül iş ve \$28/MJ maliyet değerli elektrokimyasal pillerden daha başarılı bir sonuç elde edildiği ortaya konulmuştur. Sıvı azot enerji yedekleme sisteminin kimyasal patlama tehlikesi, zehirli gaz emisyonu, zehirli atık veya düşük frekanslı elektromanyetik alan emisyonu olmadığı için yeni enerji teknolojileri arasında büyük potansiyele sahip olduğuna değinilmiştir. [10]

Washington Üniversitesinde C. Knowlen ve diğ., Kuzey Teksas Üniversitesinde ise C.A. Ordonez ve diğ. yaptıkları çalışmalarla çok düşük emisyonlu sıvı azot otomobilinin, emisyonsuz araçlar arasında çok değerli bir yerinin olduğunu göstermişlerdir. En büyük sınırlaması yakıtının enerji yoğunluğunun düşük olması nedeniyle bir dolun yakıtla az mesafe gidebilmesi olan sıvı azot otomobilinin açık çevrim güç sisteminin, kapalı Brayton çevrimine dönüştürmesiyle sistemin enerji yoğunluğu 10 kattan fazla arttırılmıştır. Böylelikle 482 kJ/kg enerji yoğunluk değerine erişen sistem, çok düşük emisyonlu bir otomobil olarak fizibil hale getirilmiştir. [5, 6, 9, 20, 21]

Joseph A. Volk'un 6166317 numaralı ABD Patentli çalışmasında ise devar kaplarına konulan kriyojenik sıvılar ile ortam arasında sıcaklık farkının termoelektrik jeneratörler kullanılarak elektrik enerjisine direk dönüşümüne yer verilmiştir. [12]

1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Sonuçlar

Hi-Z Technology Firmasının HZ-20 kodlu termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklarda deneysel karakterizasyonu yapılabilmesi için deney düzeneği oluşturulmuştur. 26 kg sıvı azot kapasiteli devar kabı içerisine yerleştirilen bakır blok sayesinde 100 K sıcaklığında soğuk rezervuar sağlanmıştır. Sıcak yüzey olarak içerisine 250W gücünde 4 adet paslanmaz ısıtıcı yerleştirilmiş bakır bir plaka kullanılmıştır. Isıtıcının gerilimi variak bir trafo ile ayarlanıp sistem istenilen sıcaklık farklarının yaratılması sağlanmıştır. Termoelektrik modüllerin Kapton filmi ile elektriksel izolasyonu sağlanmıştır. Ekipmanlar arasındaki katı katı kontağındaki yüzey bozuklukları nedeniyle oluşacak termal dirençlerin önlenmesi için ısının akması istenilen her temas yüzeyine ısı pastası sürülmüştür. Termoelektrik jeneratörün altına ve üstüne yerleştirilen bakır plakalar yüzeyine açılan kanallara termokupl yerleştirilmesi suretiyle sıcaklıklar, termoelektrik ile bakır plakalar arasında temas direnci yaratılmadan ölçülmüştür. Isı transferinin arttırılması için ısıtıcının üzerine yerleştirilen çelik bir plaka ile soğuk rezervuar olarak kullanılan bakır blok birbirine civata ile bağlanmıştır. Böylelikle termoelektrik üzerine yapılan basınç merkezden uygulanmış olmaktadır. Termoelektrik jeneratörün kutupları dijital yüke bağlanarak gerilim ve akım değerleri saniye bir veri olarak kaydedilmiştir.

Termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklarda deneysel karakterizasyonu yapılmış, düşük sıcaklıklarda iç direncin azalmasıyla birlikte Joule kayıpları azalırken, Seebeck katsayısının daha fazla azalmasından ötürü, Bismuth Telluride tabanlı termoelektrik modüller için düşük sıcaklıklarda üretilebilecek maksimum gücün, ortalama sıcaklık ile beraber düştüğü gözlenmiştir.

Gelişmiş deney düzeneği ile 134K – 350K arası çok küçük sıcaklık farkları ile taranmış, dijital yük sayesinde minimal direnç değişimleriyle, modülün gerilim - akım karakteristikleri çıkarılmıştır. Bu değerler ile güç akım, güç yük direnci ve gerilim yük direnci bağıntıları kurulmuştur. Seebeck katsayısı ve iç direncin ortalama sıcaklık ile ilişkileri saptanmış ve buradan hareketle maksimum güç ile ortalama sıcaklık arasındaki bağıntı hesaplanmıştır. Bu çalışma sayesinde, kriyojenik sıcaklıklarda Bismuth Telluride tabanlı termoelektrik jeneratör kullanılan çalışmalarda istenilen sıcaklıklarda ne kadar güç üretebileceği daha gerçekçi olarak hesaplanabilecektir.

Deney düzeneğine yerleştirilen sıkıştırma aparatı ile modül üzerine basıncın etkisi araştırılmış, basınç arttıkça ısı transferinin iyileştiği gibi, modülün sıcaklık değişimlerine cevap verme süresinin kısaldığı gözlenmiştir.

Termoelektrik jeneratörlü ısı değiştiricisi uygulama için Arıtış firmasından alınmış mevcut bir kriyojenik ısı değiştiricisi üzerine yerleştirilen 20 adet termoelektrik jeneratör ile deney düzeneği kurulmuştur. Termoelektrik modüllerin Kapton filmi ile elektriksel izolasyonu sağlanmıştır. Ekipmanlar arasındaki katı katı contağındaki yüzey bozuklukları nedeniyle oluşacak termal dirençlerin önlenmesi için ısının akması istenilen her temas yüzeyine ısı pastası sürülmüştür. Sistem kesitinde termoelektrik modüller yanında kalan boşluklar Depron adı verilen polistren ısı izolasyonu ile doldurulmuştur. Kanatçıklı yüzeyler, termoelektrik jeneratörler, izolasyon malzemeleri montaj edildikten sonra sıcaklık verilerinin toplanması için PT 100 rezistans termometreleri istenilen noktalara yerleştirilip deney düzeneği taşıma kulakları sıkılıp montaj bitirilmiştir. Rezistans termometre ve termoelektrik jeneratörlerden gelen veriler National Instruments veri toplama kartında toplanıp Labview programında görüntülenmiştir.

Mevcut kriyojenik ısı değiştirici üzerindeki uygulama düzeneğinin tamamlanmasıyla yapılan ön deneyler ile gerçekçi verilerin ölçülmesini engelleyen bir dizi sorunun olduğu anlaşılmıştır. Ölçümlerde kanatçıklı yüzeylerde havadan yeterli miktarda ısı absorbe edilemediği görülmüştür. Termoelektrik modüller üzerine uygulanan sıcaklık farkının çok düşmesi nedeniyle de modüllerden istenilen gerilim ve güç verileri ölçülememiştir.

Görülen bu sonuçlar neticesinde, ısı değiştirici dizaynı yapılırken kanatçıklı yüzeyin daha geniş tutulması, kanat genişliğinin kısa ve yer düzlemine dik konumlanması gerektiği saptanmıştır. Termoelektrik modüllerin elektriksel izolasyonu için kullanılan Kapton filmi ve ısıl dirençleri azaltmak için sürülen ısı pastası termal direnç yarattığından ilerideki çalışmalarda fabrikada izole edilmiş termoelektrik modüllerin kullanılmasına kanaat getirilmiştir.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1 Kriyojenik Akışkanlar ve Temel Özellikleri

Kriyojenik kelimesi genel olarak düşük sıcaklık durumlarının incelenmesi olarak tanımlanır. Kriyojenik ile konvansiyonel soğutmayı birbirinden ayıran sıcaklık, farklı kabuller var olsa da, genelde -150°C olarak kabul edilir. Bu kabulle beraber, kaynama sıcaklığı -150°C 'nin üzerinde olan yerel soğutma, klima ve derin dondurucularda kullanılan soğutucu akışkanlar konvansiyonel soğutma grubunda, kaynama sıcaklığı 150°C 'nin altında olan helyum, hidrojen, oksijen, azot ve hava gibi akışkanlar ise kriyojenikler grubunda incelenir. [2]

Kriyojenik koşullarda çalışan bir sistem için analiz yapılırken, malzemelerin termal ve transport özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır. Kriyojenik sıcaklıklardaki ısı transferi hesaplamaları için önemli termal özellikler olan gazlar ve sıvılar için özgül ısı ve termal iletkenlik değerlerine aşağıda değinilmiştir. [2]

2.1.1 Gazların özgül ısıları

Malzemelerin özgül ısı; sabit hacimde özgül ısı c_v , ve sabit basınçta özgül ısı c_p olmak üzere iki farklı değerle ifade edilir. Genel olarak, bu iki özgül ısı arasındaki fark Denklem 2.1'de verildiği şekildedir.

$$c_p - c_v = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'deki kısmi diferansiyel ifadeleri gazın termal genişleme katsayısıyla ilgilidir.

$$\beta_t = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \quad (2.2)$$

Düşük basınçlardaki gazlar için (kritik basınç değerinin %10'undan düşük), gazın davranışı ideal gaz modeline yakın kabul edilebilir,

$$pv = RT \quad (2.3)$$

İdeal gaz kabulüyle iki özgül ısı arasındaki fark Denklem 2.4'deki gibi olur,

$$c_p - c_v = R \quad (2.4)$$

Gerçek koşullarda, özgül ısılar arasındaki fark gazın sıcaklık ve basıncına bağlıdır. Sık rastlanan kriyojenik gazların ideal gaz özgül ısıları Çizelge 2.1' de verilmiştir. İdeal gaz için özgül ısılar, gaz basıncından bağımsız ama genelde sıcaklığa bağlıdır.

Çizelge 2.1 : Çok düşük basınç ve 300 K sıcaklıkta ideal gazların özgül ısıları.

Gas	C_p (kJ/kg-K)	C_v (kJ/kg-K)	R (kJ/kg-K)	C_p / C_v -
Helyum	1.24	0.744	386.0	1.667
Hidrojen	3.393	2.408	766.0	1.409
Neon	0.246	0.1475	76.55	1.667
Nitrojen	0.248	0.1772	55.15	1.4
Hava	0.240	0.1714	53.35	1.4
Argon	0.1242	0.0745	38.68	1.667
Oksijen	0.220	0.1579	48.28	1.393
Metan	0.533	0.409	96.35	1.303

Gazların özgül ısılarındaki sıcaklık varyasyonunun fiziksel bir nedeni, farklı sıcaklıklarda farklı enerji depolama biçimlerinin baskın gelmesidir. Klasik eşdağılım teoremine göre, bir atom ya da molekül içerisine depolanmış enerji çeşitli enerji biçimlerine eşit dağılmış durumdadır. Eşdağılım teoremini Denklem 2.5'deki şekilde ifade edilir,

$$c_v = 1/2Rf \quad (2.5)$$

Burada f malzemeyi oluşturan moleküllerden birinin serbestlik derecesidir. Helyum, neon ve argon gibi monatomik gazlar için belirgin tek enerji depolama biçimi molekülün kinetik enerjisinde değişimdir. Monatomik gazlar için özgül ısılar $c_v = 3/2R$ ve $c_p = 5/2R$ şeklindedir.

Helyum gazının özgül ısısı ortam sıcaklığından 2000 K'ne kadar sabittir. Monatomik gazlar için özgül ısılar arasındaki oran c_p/c_v yaklaşık olarak 5/3'tür.

Diatomik ve daha birleşik gazlarda, diğer enerji biçimleri de görülebilir. Örnek olarak nitrojen molekülleri iki karşılıklı dikey ekseninde dönebilir, dolayısıyla iki ek rotasyonel özgürlük dereceleri bulunur. Diatomik moleküller için özgül ısılar $c_v = 5/2R$ ve $c_p = 7/2R$ şeklindedir. [2]

Gerçek koşullara bakılacak olursa, gaz sıcaklığının yeteri kadar düşük olduğu değerlerde rotasyonel enerji depolama biçimi görülmez. Gazın bu davranışını en belirgin olarak hidrojende gözlemlenir. Gaz molekülünün rotasyonu, gaz sıcaklığının $2\Theta_R$ değerinin üzerinde olduğu koşullarda belirgin hale gelir. Rotasyon $\Theta_R/3$ değerinden düşük sıcaklıklarda belirsizdir. Θ_R karakteristik rotasyon sıcaklığı olarak adlandırılır ve Denklem 2.6'deki gibi formüle edilir,

$$\Theta_R = \frac{h^2}{8\pi^2 I k} \quad (2.6)$$

h = Planck sabiti = 6.625×10^{-34} J-s

I = Molekülün dik eksenden atomlar arası eksene atalet momenti

k = Boltzmann sabiti = 1.3805×10^{-23} J/K

Diatomik gazların çoğu rotasyon sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda sıvı halde bulunduğu için, rotasyon her zaman gözlenir. Örnek olarak azotun karakteristik rotasyon sıcaklığı $\Theta_{R\text{nitrojen}} = 2.86$ K iken normal kaynama noktası 77.4 K'dir, dolayısıyla gaz fazındayken her zaman moleküler rotasyon mevcuttur.

Hidrojen, küçük atalet momenti nedeniyle bir istisnadır. Karakteristik rotasyon sıcaklığı $\Theta_{R\text{hidrojen}} = 85.4$ K ki bu değer hidrojenin normal kaynama noktası olan 20.3 K' den çok daha yüksektir. 30 K'nin altındaki sıcaklıklarda hidrojen atomu içerisinde depolanan enerji sadece atomun kinetik enerjisidir dolayısıyla, özgül ısı gaz sabitinin 1.5 katıdır, $c_p = 1.5R$. Sıcaklık 30 K'nin üzerine çıkmaya başladığında hidrojen gazının özgül ısı gaz sabitinin 2.5 katı olur, $c_p = 2.5R$ dolayısıyla ısı ile sıcaklık değişim hızı ani olarak değişmektedir. Hidrojen kullanılacak bir ısı değiştiricisi dizayn edilirken, özgül ısıdaki bu ani değişimler hesaba katılması gereken önemli bir faktördür. Hidrojenin belirli sıcaklıklardaki özgül ısıları Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 2.2 : 1 atm'deki hidrojen gazının özgül ısısı.

Sıcaklık (K)	C_p (kJ/kg-K)	C_v (kJ/kg-K)	C_p / C_v -	C_p / R -
20.3	12.154	6.504	1.869	1.577
40	10.356	6.231	1.662	1.511
60	10.51	6.385	1.646	1.548
80	10.73	6.605	1.625	1.601
100	11.14	7.015	1.588	1.701
150	12.408	8.283	1.498	2.008
200	13.451	9.326	1.442	2.261
250	13.946	9.821	1.42	2.381
300	14.22	10.095	1.409	2.447

2.1.2 Sıvıların özgül ısıları

Üç fazdan (katı, sıvı, gaz) malzeme özelliklerinin öngörülmesi için kullanılacak en az veri sıvı fazındır. Gaz fazında moleküller birbirinden çok ayrıktır, belli bir düzeni yoktur. Kristalize katılarda ise moleküller bir düzende dizilmiş şekilde dururlar. Sıvılar ise donma noktası civarında katı gibi, kaynama noktası civarında ise gaz gibi davranış gösterir. [2]

Genel olarak sıvıların özgül ısıları, kritik noktalara yakın koşullar istisna olmak üzere, sıcaklığın güçlü bir fonksiyonu değildir. Çizelge 2.3'te kriyojenik sıvıların termal ve transport özellikleri verilmiştir. [2]

Çizelge 2.3: 101.3 kPa basınç altında bazı kriyojenlerin termal ve transport özellikleri.

Gaz	Sıcaklık (K)	ρ_f (kg/m ³)	C_p (kJ/kg-K)	μ ($\mu Pa-s$)	k (mW/m-K)	h_{fg} (kJ/kg)	Pr	σ_L (mN/m)	β_t (K ⁻¹)
Helyum	4.214	124.8	4.48	3.563	27.2	20.9	0.587	0.093	0.1512
Parahidrojen	20.27	70.79	9.68	13.2	118.5	443	1.078	1.93	0.01694
Neon	27.09	1206	1.83	130	113	85.9	2.11	4.82	0.1447
Nitrojen	77.36	807.3	2.051	158	139.6	199.3	2.32	8.75	0.00566
Oksijen	90.18	1141	1.695	190	151.4	213	2.13	13.2	0.00413
Argon	87.28	1393.9	1.136	252	123.2	161.9	2.32	11.08	0.00433
Metan	111.7	424.1	3.451	118	193.1	511.5	2.11	14.1	0.00349
Hava	78.8	874	1.96	167.5	141	205.2	2.33	10.37	0.00502

2.1.3 Gazların termal iletkenliği

Termal iletkenlik ifadesi Fourier denklemiyle tanımlanır.

$$Q = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Denklemdede Q, x doğrultusunda transfer olan ısı, A x doğrultusundaki alan, k_t ise malzemenin termal iletkenliğidir.

Gazlardaki enerji transfer mekanizması, yüksek hızlı moleküllerin düşük hızlı moleküllere kinetik enerji transferidir. Bir molekülün iç enerjisi Denklem 2.8'de verildiği şekilde ifade edilebilir,

$$U = mc_v T \quad (2.8)$$

Gaz molekülü, diğer moleküle çarpmadan önce ortalama bir mesafe ' λ ' yol alır. Çarpışma sırasında gaz molekülünün iç enerji değişimi,

$$\Delta U = -\frac{dU}{dx} \lambda = -mc_v \frac{dT}{dx} \lambda \quad (2.9)$$

Gazların kinetik teorisine göre birim zamanda birim alandan geçen molekül sayısı,

$$N / A = 1/3(N/V)\bar{v} \quad (2.10)$$

N/V birim hacimdeki molekül sayısı, v ise ortalama moleküler hız olarak ifade edilir. Birim alandan toplam ısı transferi 2.9 ve 2.10 denklemleri birleştirilerek bulunabilir.

$$\frac{Q}{A} = \left(\frac{N}{A}\right) \Delta U = 1/3 \left(\frac{Nm}{V}\right) c_v \bar{v} \lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.11)$$

Gaz yoğunluğu $\rho = Nm/V$ şeklinde ifade edilir. Denklem 2.7 ile 2.11 birleştirildiğinde gazın termal iletkenliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$k_t = 1/3 \rho c_v \bar{v} \lambda \quad (2.12)$$

İdeal gaz için yoğunluk ifadesi $\rho = p/RT$, ortalama molekül arası mesafe ise Denklem 2.13'deki şekildedir,

$$\lambda = \frac{\mu}{p} \left(\frac{\pi RT}{2g_c} \right)^{1/2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\pi}{2g_c RT} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Burada μ gaz viskozitesi, p gaz basıncı, g_c ise Newton yasasındaki birim dönüşüm faktörüdür. İdeal gazın özgül ısısı göreceli olarak sabittir ve ortalama molekül hızı Denklem 2.14'deki şekilde ifade edilir,

$$\bar{v} = (8g_c RT / \pi)^{1/2} \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve 2.14, Denklem 2.12'ye yerleştirilirse gazın viskozite ve termal iletkenliğinin sıcaklık bağımlı olduğu görülür.

$$k_t = \text{constant} \times T^{1/2} \quad (2.15)$$

Çizelge 2.4'te gözüktüğü üzere atmosferik basınçta kriyojenik sıcaklıklardaki gazların termal iletkenliği mutlak sıcaklığın eksponansiyel fonksiyonu olarak değişir.

$$k_t = C_0 T^n \quad (2.16)$$

Fonksiyondaki üs değeri genelde $0.6 < n < 0.9$ arasında değişir. Azot ve oksijen gibi gazların termal iletkenliği, helyum ve hidrojen gibi moleküler ağırlığı daha düşük olan gazların termal iletkenliğinden daha düşüktür. Bazı kriyojenik gazların atmosferik basınçtaki termal iletkenlikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Atmosferik basınçta bazı kriyojenik gazların termal iletkenlik katsayıları.

Sıcaklık (K)	Termal İletkenlik (W/m-K)				
	Helyum	Hidrojen	Neon	Nitrojen	Oksijen
300	0.150744	0.173416	0.049152	0.025787	0.026584
275	0.142437	0.167013	0.046037	0.024005	0.024714
225	0.124957	0.139494	0.039979	0.019972	0.020318
175	0.105919	0.111457	0.033576	0.015767	0.015905
125	0.084977	0.082381	0.02648	0.011492	0.011457
100	0.073555	0.067497	0.022672	0.009311	0.009225
75	0.060921	0.052094	0.018518	-	-
50	0.046729	0.036172	0.014019	-	-
30	0.033403	0.022845	0.009692	-	-
20	0.025614	0.015922	-	-	-

2.1.4 Sıvıların termal iletkenliği

Sıvıların özgül ısılarının saptanmasında yaşanan zorlukların benzeri, sıvıların termal iletkenliğinin saptanmasında da yaşanır. Yalnız gazlar için kullanılan kinetik teori, parametreler sıvılara uygun yorumlandığı takdirde, sıvılar için de kullanılabilir. \bar{v} hızı bu sefer sıvı moleküllerinin enerji transfer hızını simgelemektedir. Bu hız değeri sıvı içerisindeki sonik hız, v_a , ile orantılıdır.

$$\bar{v} = \sqrt{8 / \gamma \pi v_a} \quad (2.17)$$

Buradaki γ , c_p/c_v oranını ifade eder ve sıvılar için yaklaşık 1'dir. Sıvılar için ortalama molekül arası mesafe Denklem 2.18'deki şekilde ifade edilir,

$$\lambda = \left(\frac{M}{N_0 \rho} \right)^{1/3} \quad (2.18)$$

Burada M sıvının molekül ağırlığı, ρ sıvı yoğunluğu ve $N_0 = 6.0221 \times 10^{23}$ (1/mol) Avogadro sayısıdır. Bu parametreler kullanıldığında sıvının termal iletkenliği yaklaşık %4 sapma ile hesaplanabilir.

Kriyojenik sıvılarda, doymuş sıvıların termal iletkenliği sıcaklığın düşüşüyle genelde artış gösterir. Bu yukarıdaki denklemlerden de çıkarılabilir. Fakat helyum ve hidrojen farklılık gösterir ve sıcaklığın düşüşüyle bu iki doymuş sıvının termal iletkenliği düşer.

2.2 Azotun Termodinamik ve Transport Özellikleri

Doymuş sıvı azotun ve doymuş gaz azotun belirli sıcaklıklardaki termal ve transport özellikleri Çizelge 2.5 ve 2.6'da verilmiştir. Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki özgül ısı, entropi, entalpi, termal iletkenlik ve viskozite grafikleri Şekil 2.1 – 2.6'da verilmiştir.

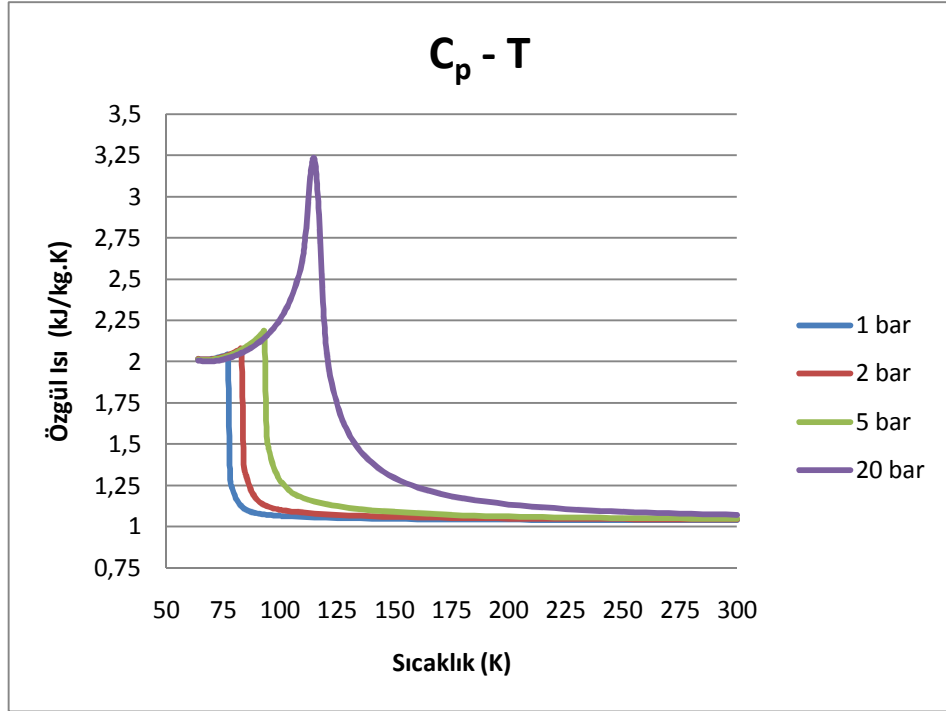
[14]

Çizelge 2.5 : Sıvı azotun termal ve transport özellikleri.

Sıc. (K)	P _{sat} (kPa)	ρ _f (kg/m ³)	C _p (kJ/kg-K)	μ (μPa-s)	k (mW/m-K)	h _{fg} (kJ/kg)	Pr -	σ _L (mN/m)	β _t (K ⁻¹)
65	17.4	860.9	2.008	278	158.7	214	3.52	11.66	0.0047
70	38.5	840	2.024	220	149.9	208.3	2.97	10.48	0.00504
75	76	818.1	2.042	173	143	202.3	2.47	9.3	0.00544
77.36	101.3	807.3	2.051	158	139.6	199.3	2.32	8.75	0.00566
80	136.7	795.1	2.063	141	136.2	195.8	2.14	8.22	0.00592
85	228.4	771	2.088	119	129.3	188.7	1.922	7.18	0.0065
90	359.8	745.6	2.122	104	122.4	180.9	1.803	6.12	0.00723
95	539.8	718.6	2.17	93	115.5	172	1.747	5.08	0.00816
100	777.8	689.6	2.24	85	108.5	161.6	1.755	4.04	0.00942
105	1083.6	657.7	2.35	78	101.1	149.4	1.813	-	0.01119
110	1467.2	621.7	2.533	73	93.6	135	1.976	-	0.01394
115	1939.4	579.3	2.723	68	84.7	117.3	2.19	-	0.01884
120	2512.9	524.9	2.92	65	74.6	94.3	2.54	-	0.0305
125	3204.4	436.8	3.124	62	61.5	54.9	3.14	-	-

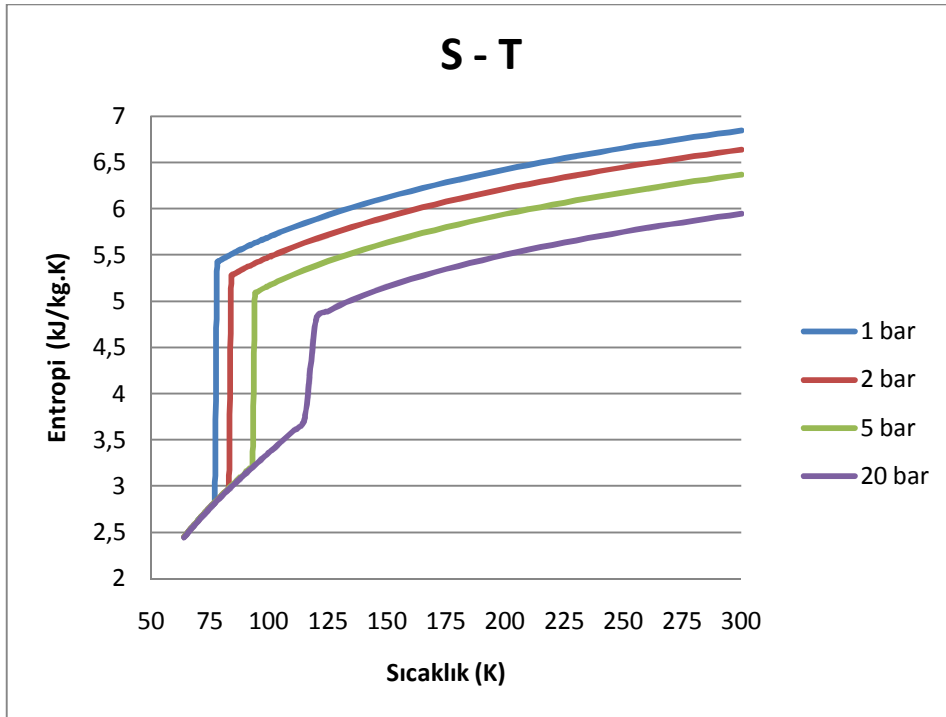
Çizelge 2.6 : Gaz azotun termal ve transport özellikleri.

Sıcaklık (K)	P _{sat} (kPa)	ρ _g (kg/m ³)	C _p (kJ/kg-K)	μ (μPa-s)	k (mW/m-K)	h _{fg} (kJ/kg)	Pr -
65	17.4	0.911	1.056	4.62	6.12	214	0.797
70	38.5	1.893	1.064	4.95	6.58	208.3	0.8
75	76	3.532	1.076	5.29	7.03	202.3	0.81
77.36	101.3	4.604	1.084	5.41	7.23	199.3	0.811
80	136.7	6.071	1.095	5.62	7.49	195.8	0.822
85	228.4	9.789	1.13	5.94	7.95	188.7	0.844
90	359.8	15.027	1.185	6.27	8.4	180.9	0.885
95	539.8	22.21	1.279	6.6	8.86	172	0.953
100	777.8	31.9	1.407	6.98	9.33	161.6	1.053
105	1083.6	44.93	1.593	7.54	10.16	149.4	1.182
110	1467.2	62.57	1.88	8.26	11.14	135	1.394
115	1939.4	87.21	2.36	9.32	12.59	117.3	1.75
120	2512.9	124.44	3.29	10.27	13.91	94.3	2.43
125	3204.4	197.08	5.86	12.86	16.69	54.9	4.51

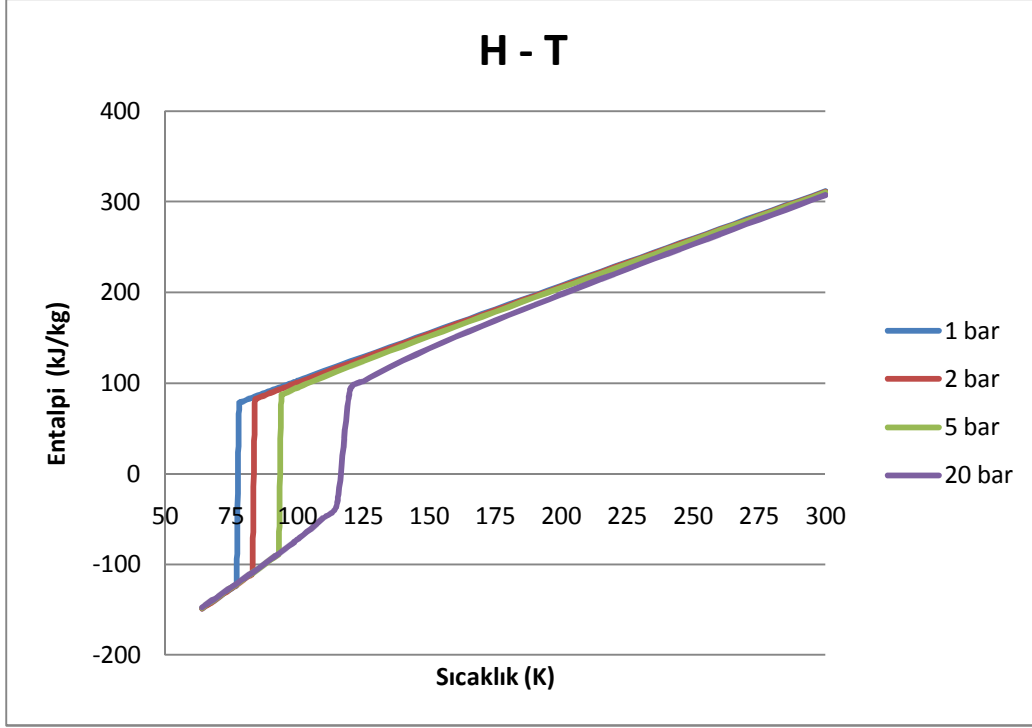


Şekil 2.1 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki özgül ısı – sıcaklık grafiği.

Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki özgül ısı - sıcaklık, entropi – sıcaklık ve entalpi - sıcaklık grafikleri Şekil 2.1 – 2.3’da verilmiştir. [14]

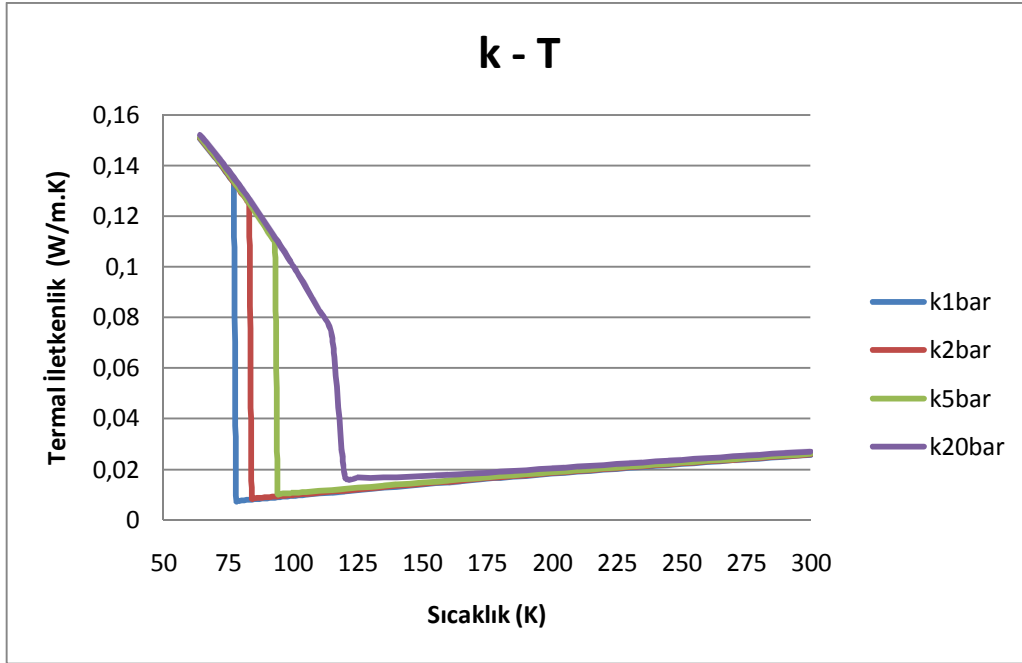


Şekil 2.2 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entropi – sıcaklık grafiği.

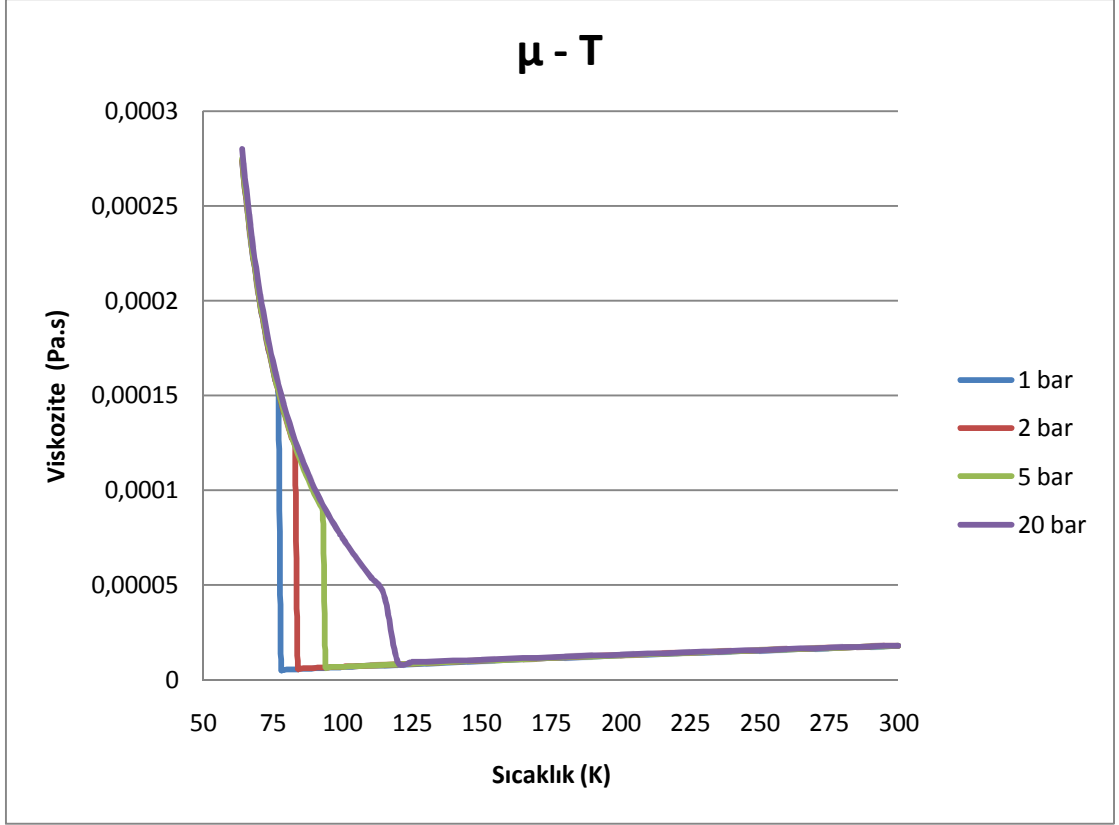


Şekil 2.3 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entalpi – sıcaklık grafiği.

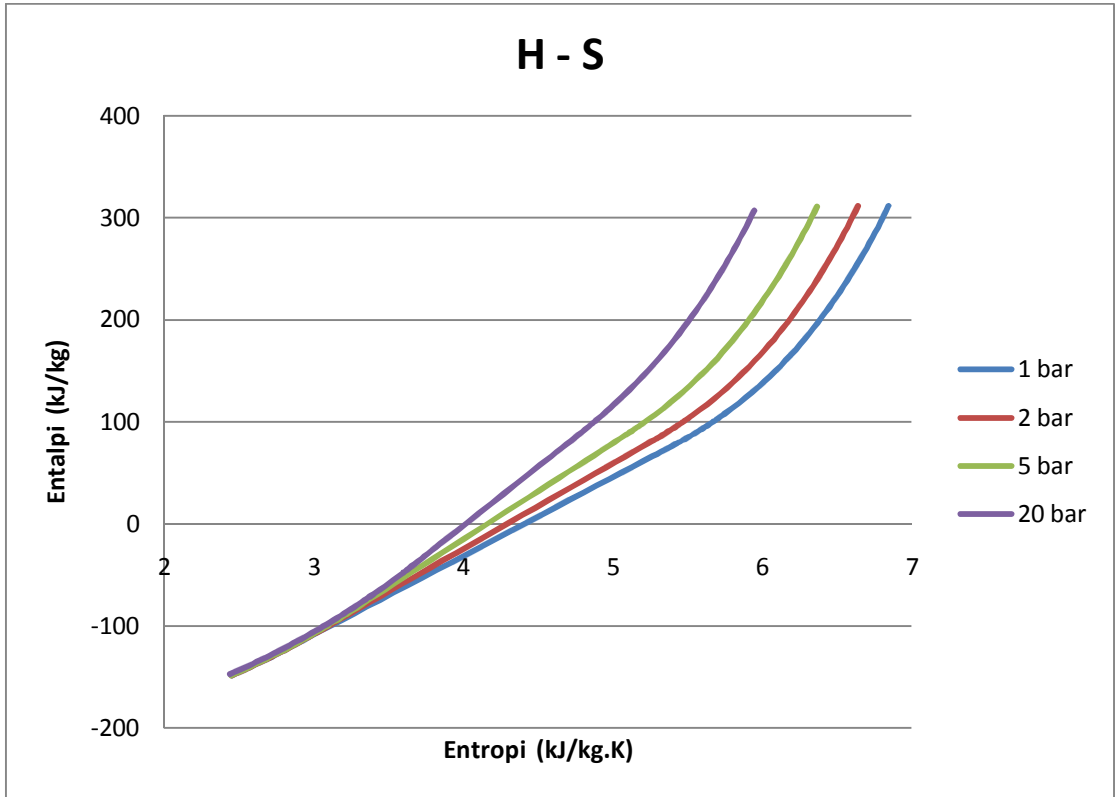
Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki termal iletkenlik - sıcaklık, dinamik viskozite – sıcaklık ve entalpi - entropi grafikleri Şekil 2.4 – 2.6’da verilmiştir. [14]



Şekil 2.4 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki termal iletkenlik – sıcaklık grafiği.



Şekil 2.5 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki dinamik viskozite – sıcaklık grafiği.



Şekil 2.6 : Azotun 1, 2, 5 ve 20 bardaki entalpi – entropi grafiği.

2.3 Kriyojenik Isı Transferi

Kriyojenik ısı değiştiricilerinde, normal sıcaklıktaki ısı değiştiricilerinde problemler yanında kriyojenik sıcaklıklara özel problemlerle de karşılaşılır. Karşılaşılan problemlerden yaygın olanlara aşağıda değinilmiştir. [14]

Değişken malzeme özelliklerinin etkisi: Kriyojenik sıcaklıklarda, malzemelerin transport özellikleri genellikle ciddi oranlarda değişir. Örneğ olarak, oda sıcaklığında metallerin özgül ısısı 50°C 'lik sıcaklık değişiminde %5'ten az bir farklılık gösterirken, düşük sıcaklıklarda katıların özgül ısısı mutlak sıcaklığın küpü oranda değişir. Dolayısıyla özellikler sabit alınarak yapılan analizlerde, çoğu sıcaklık koşulunda yaklaşık sonuç alınsa da, kriyojenik sıcaklıklarda genellikle hatalı sonuç elde edilir. [14]

Isıl İzolasyon: Kriyojenik sıvıların buharlaşma ısıları, diğer sıvılarınkinden düşüktür. Örneğin, sıvı azotun buharlaşma ısısı 1 atm basınç altında 199,3 kJ/kg iken, suyun 1 atm basınç altında buharlaşma ısısı 2257 kJ/kg 'dır. Sıvılaştırma maliyetleri, güvenlik önlemleri ve düşük buharlaştırma ısısı nedeniyle kriyojenik tanklarda özel yüksek performanslı izolasyon uygulamaları gerekmektedir. Kriyojenik tanklarda kullanılan çok katmanlı izolasyonların ısı iletim katsayısı, mahallerin izolasyonunda kullanılan cam yünü izolasyonun ısı iletim katsayısının 1000'de 1'idir.

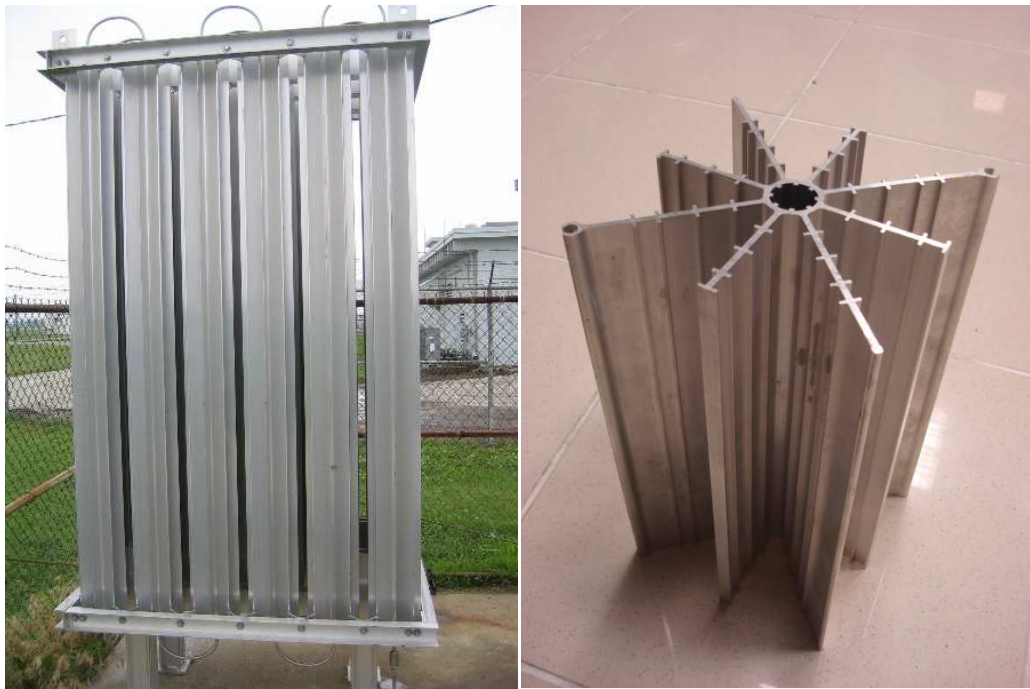
Kritik noktaya yakın taşınım: Çoğu kriyojenik akışkanın termodinamik kritik basınç değeri, konvansiyonel akışkanların kritik basınç değerinden çok daha düşüktür. Kriyojenik sistemlerde kritiğe yakın veya süper kritik koşullara, ortam veya yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerden daha sık rastlanır.

Isıl radyasyon problemleri: Kara cisim radyasyonu için pik ışımsal yoğunluğun olduğu dalga boyu mutlak sıcaklıkla ters orantılıdır. Örneğin, oda koşullarında dalga boyunun pik değeri 0.01mm'de gözlenirken, 1 K 'de pik 2.9mm'lik dalga boyunda görülür. Dolayısıyla kriyojenik sistemlerde radyant ısı kaçaklarını önlemek için bu ölçülere yakın kalınlıkta metalik kalkanlar kullanılır.

Isı Değiştirici dizaynı : Sıvılaştırma sistemleri ve kriyojenik soğutuculardaki ısı değiştiricileri ya yüksek verimlerde ya da sadece birkaç derecelik akışkan yaklaşım sıcaklıklarıyla çalışmak zorundadırlar. Gaz türbini ısı değiştiricileri, hava şartlandırıcı ısı değiştiricileri ve diğer konvansiyonel soğutma sistemleri gibi normal ve yüksek sıcaklıktaki sistemlerde daha geniş yaklaşım sıcaklıkları tolere edilebilmektedir.

2.3.1 Kriyojenik evaporasyon

Kriyojenik ısı transferinin görüldüğü en yaygın sistemler; hava yoğuşturucuları, kriyojenik soğutucular ve günlük hayatta en rahat karşılaşabilecek olan kriyojenik evaporatrlerdir. Sıvılaştırılmış doğalgaz (LPG) kullanılan tesislerde, sıvı doğalgaz tankından gaz talep edildiğinde, çekilen sıvı tankın yanındaki bir ısı değiştiricisi ile buharlaştırılır. Isı kaynağı olarak ortam havası kullanılır. Kanatlı borular üzerinden doğal taşınım ile akan hava ısısını boru yüzeyine oradan da sıvı metana verir. Nemin yüksek olduğu koşullarda boru kanatları üzerinde nem yoğuşur ve donup buz katmanları oluşturur. [14]



a)

b)

şekil 2.7 : a) Atmosferik azot evaporatörü, b) Evaporatör profili.

Şekil 2.7a'da bir atmosferik azot evaporatörü görülmektedir. Basınç değerine göre evaporatörün malzemesi belirlenir. Şekilde görülen evaporatör, paslanmaz çelik borunun üzerine paslanmaz çelik lamalar kaynatılarak imal edilmiştir. Fakat daha düşük basınçlarda çalışacak sistemlerde, hem imalat kolaylığı, hem de düşük malzeme maliyeti nedeniyle alüminyumun ekstrüzyonla kanatlı boru profili verilmiş hali kullanılmaktadır. Şekil 2.7b'de alüminyum evaporatör profili görülmektedir.

İklim koşullarının ağır olduğu bölgelerde atmosferik evaporatörlerdeki ısı transferi dramatik şekilde düşer. Bu durumlarda çok büyük evaporatörler kullanılmaktansa, elektrikli ısıtıcı veya tesisteki bir atık ısıyla atmosferik evaporatörün desteklenmesi daha uygundur. Gerekirse manüel olarak evaporatör üzerinde oluşan buz katmanının temizlenmesi düşünülebilir. Şekil 2.8'de çalışma esnasında buzlanma oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.8 : Evaporatör üzerinde buzlanma oluşumu.

Dış ortam sıcaklığının düşük, buharlaştırma talebinin yüksek olduğu koşullarda ise sıcak sulu evaporatörler kullanılmaktadır. Dış ortam sıcaklığının düşük, buharlaştırılacak sıvının buharlaşma sıcaklığının ise yüksek olduğu koşullarda, örneğin karbondioksit, Şekil 2.9a ve 2.9b de görüldüğü gibi buharlı ve elektrikli evaporatörler kullanılmaktadır.



a)



b)

Şekil 2.9 : a) Buharlı evaporatör, b) Elektrikli evaporatör.

Projemizde incelenecek olan, üzerine termoelektriklerin yerleştirileceği ısı değiştiricisi de aslında bir evaporatördür. Sıvı azot buharlaşırken, havadan aldığı ısı termoelektrikler üzerinden geçirilecek ve termoelektrikler üzerinde doğrulacak sıcaklık farkıyla elektrik enerjisi üretilmek amaçlanmaktadır. Dolayısıyla bu ısı değiştiricisinde dış ortam havası ile azot buharlaştırılacaktır.

Sıvı azot ile temasta bulunacak olan buharlaştırıcının iç yüzeyi, içerde buharlaşma da olacağı için ısı transfer yüzey alanı gereği, hava ile temas içinde olacak buharlaştırıcı dış yüzeyinin ısı transfer yüzey alanı gereğinden çok daha düşük olacaktır. Buharlaştırıcının dış yüzeyine gerekli alanı da, diğer evaporatörler gibi kanatlar kullanılacaktır. Fakat termoelektrik jeneratörler için düz bir yüzey gerektiği için bu kanatlar bir boru yüzeyine değil, düz bir plaka üzerine yerleştirilecektir. Bu ısı değiştiricisinde dizayn edilmesi gereken en önemli nokta kanatlı yüzeyin boyutlarıdır, çünkü ısının en zor transfer edileceği bölüm burasıdır. Bu yüzden aşağıdaki bölümde kanatçıklı yüzeylerde ısı iletimi hakkında temel bilgilere değinilecektir.

2.3.2 Kanatçıklı yüzeylerde ısı iletimi

Genişletilmiş ve kanatçıklı yüzeylerden ısı transferi de kriyojenik sistemlerde karşılaşılan bir diğer ısı transferi problemidir. Kanatçıklı yüzeylerin ısıl analizi, kanadın enine uzunluğu boyunca sıcaklık farkı genelde ihmal edilebildiği için tek boyutlu yaklaşımla yapılmaktadır. İlaveten, eğer kanatçıklar dış ortama açıksa, kanatçıkların üzerinde buz oluşuma görülür. [14]

Kriyojenik akışkanların dış ortam sıcaklığı ile buharlaştırılmasında yaygın olarak kullanılan kanatçıklı yapının enine kesiti aşağıda verildiği gibidir. Lama şeklindeki kanatçıklar boru eksenine dik olacak şekilde boru üzerine yerleştirilmiştir. Konvansiyonel soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanın dış ortamla buharlaştırılmasında kullanılan kanatlı borular dairesel kanatlıdır ve ısı transferi açısından dairesel kanatlar boylamasına kanatlardan daha verimlidir. Fakat kriyojenik sistemlerde oluşan buzlanma ile dairesel kanatçıklar arasında buz köprüleri oluşup ısı transferi ciddi oranda düştüğü için boyuna kanatçıklar kullanılır.

Kanatçık sistemindeki bir diferansiyel eleman aşağıda verilmiştir. Bu elemandan iletilen net ısı transferi elemanın yüzeyinden taşınan ısıya eşittir.

$$\frac{d}{dx} \left(k_t A_c \frac{dT}{dx} \right) = \left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta_{fr}}{k_{fr}} \right)^{-1} . P_f (T - T_a) \quad (2.19)$$

Burada k_t kanat malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı, k_{fr} kanat üzerindeki buz oluşumunun ısıl iletkenlik katsayısı, δ_{fr} ise buzun katmanının kalınlığını simgelemektedir. Eğer yassı kanatçığın kesit alanının kesit alanının sabit olduğu varsayılırsa denklem (2.19), denklem (2.20) formunda yazılabilir;

$$\frac{d^2 \Theta}{dx^2} - m^2 \Theta = 0 \quad (2.20)$$

$$\Theta = (T - T_a) \quad (2.21)$$

Denklemden m parametresi ise;

$$m^2 = \frac{P_f}{k_f A_c} \left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta_{fr}}{k_{fr}} \right)^{-1} \quad (2.22)$$

Yassı kanatlar için $(A_c/P_f) = \delta/2$ olarak kabul edilir. Buradaki δ daha önceden de değinildiği gibi kanat kalınlığını simgeler.

Yassı kanatın ucundan olan ısı transferi yok sayılırsa ($x=L$ 'de $q=0$) ve kanatın başındaki sıcaklık T_0 ($x=0$, $\Theta=T_0-T_a$) ise kanat içerisindeki sıcaklık dağılımı;

$$\frac{\Theta}{\Theta_0} = \frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh(mL)} \quad (2.23)$$

Eğer kanatın ucundan ısı transferi ihmal edilemeyecek boyutlarda ise çözüm eşdeğer uzunluk (L_e) belirlenerek çözülür.

$$L_e = L + e \quad (2.24)$$

$$e = \frac{1}{m} \tanh^{-1} \left(\frac{mA_c}{P_f} \right) \quad (2.25)$$

Eğer (mA_c/P_f) terimi 0,2 'den daha düşük ise ilave uzunluk değeri $e = A_c/P_f = \delta/2$ olur.

2.3.3 Kriyojenik sıcaklıklarda buzlanma özellikleri

Kriyojenik sıcaklıklardaki buzlanmanın üzerindeki enerji taşınımı komplike bir prosestir. Isı iletimi sulu buz ve buzun içerisine hapsolan gaz partikülleri içerisinden gerçekleşir. Aynı zamanda kütle transferi ve su buharlarının difüzyonu ile de enerji aktarımı sağlanır. Buzlanmanın ısıl iletim katsayısı yoğunluğuna bağlıdır. Buzlanma yoğunluğu havadaki nem oranıyla doğru orantılıdır, nem arttıkça oluşacak buzlanmanın yoğunluğu da artar. Buz üzerinden akan havanın bazı noktalarda buzlanmayı bölmesiyle transfer analizi daha karışık hale gelir. [14]

Buzlanmanın ısı iletimi zaman bağımlıdır. Kriyojenik sıcaklıklarda buzlanma dallı bir yapı şeklinde gelişir. Buz dalları büyüdükçe, buzlanma yoğunluğu ve ısı iletkenlik artar. Eğer buzlanma katmanının yüzey sıcaklığı 0°C 'ye ulaşırsa, su tanecikleri katman yüzeyinde yoğunlaşır ve ince bir katı buz tabakası oluşturur. Buzun ısı iletkenliği (1,88 W/m-K) tıysü buzlanmanınkinden çok daha yüksektir. Dolayısıyla yüzeyde buz tabakası oluştuğça buzlanma katmanının ısı iletkenliği artar. Isı transferinin başlamasından birkaç saat sonra kriyojenik sıcaklıkta oluşan buzlanmanın ısı iletkenliği durgun bir değere ulaşır. Bu koşullarda buzlanmanın ortalama ısı iletkenlik katsayısı Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Kriyojenik sıcaklıklarda H₂O buzunun termal iletkenlik katsayısı.

Sıcaklık (K)	Termal İletkenlik (mW/m-K)
80	162.7
90	98.3
100	65.1
110	40.5
120	23.9
130	20.8
140	23.4
160	41.4
180	59.2
200	77

2.4 Termoelektrik Etkiler ve Termoelektrik Jeneratörler

Herhangi bir elektrik alanı olmadan bir iletkenin uçları arasına sıcaklık farkı uygulanırsa, ısı akışı oluşmakla beraber, bir de elektrik akımı oluşur ve bu akım termoelektrik akım olarak adlandırılır. Fakat bu elektrik akımının gözlenebilmesi için devrenin kapanması gerekmektedir. Eğer aynı metalin iki aynı biçimdeki parçasından simetrik bir devrede oluşturulursa, simetriklikten dolayı net bir elektrik akımı oluşmayacaktır. Aynı metaller arasında sıcaklık farklılıklarının oluşturduğu akımlar birbirlerini eşitleyecek, akışın olmasını önleyecektir. Termoelektriği gözlemek için devrenin ya iki farklı malzemeyle ya da aynı malzemenin iki farklı konumdaki haliyle (örneğin biri baskı altında diğeri boşta olabilir) oluşturulması gerekir. Böylece termoelektrik özellikler arasındaki net farktan dolayı akım ölçülebilir. [8]

Yapılan araştırmalarla dönüşüm sıcaklığı altındaki bir süper iletkenin hiçbir termoelektrik etki göstermediği görölmüştür. Bu durum kullanılarak, termoelektrik özellikleri bilinmek istenilen bir metal ve bir süper iletken kullanılarak oluşturulan devre ile metalin mutlak termoelektrik özellikleri direkt olarak ölçülebilir. Burada kısıtlayıcı olan, süper iletkenin oluşturulabileceği sıcaklıktır. Genelde dönüşüm sıcaklığı bilinen en yüksek (18K) olan Nb₃Sn bileşiği kullanılır. [8]

Sıcaklık farklarının yukarıda anlatıldığı şekilde elektrik potansiyeline doğrudan dönüşümü termoelektrik etki olarak adlandırılır. Termoelektrik etki kullanılarak üretilen cihazlar, iki yüzü arasında sıcaklık farkı olduğunda voltaj üretirler. Karşıt şekilde cihaz üzerinden akım geçirildiğinde, iki yüzeyi arasında sıcaklık farkı oluşur. Üç ana termoelektrik etki; Seebeck, Peltier ve Thomson etkileridir. [7]

2.4.1 Seebeck etkisi

Seebeck etkisi, iki farklı metal ya da yarı iletkenin uçları arasında oluşturulan sıcaklık farkının yarattığı elektriksel potansiyel fark olarak tanımlanmıştır. Termoelektrik yapıların temellerini atan Thomas Johann Seebeck, 1821 yılında, iki farklı metalin uçları arasında sıcaklık farkı yaratıldığında pusula iğnesinin saptığını keşfetmiştir, fakat sıcaklık farkının akım değil manyetik alan doğurduğunu ve bunun termomanyetik bir etki olduğunu düşünmüştür. Pusula iğnesinin sapmasının asıl nedeni metallerin sıcaklık farklarına farklı tepkiler vermesiyle oluşun akım döngüsünün yarattığı manyetik alandır. Hans Christian Ørsted, Seebeck etkisini doğru yorumlayıp termoelektrik terimini ilk olarak telaffuz ederek kilit bir rol oynamıştır. Seebeck etkisi ile oluşun gerilimin değer;

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (2.26)$$

şeklinde belirlenir. S_A ve S_B terimleri Seebeck katsayısı olarak tanımlanır, birim olarak V/K ya da daha yaygın μ V/K olarak ifade edilebilir. Sıcaklığın nonlinear bir fonksiyonu olan Seebeck katsayısı iletkenin; mutlak sıcaklığına, malzemesine ve moleküler yapısına bağlıdır. Bazı malzemelerin Seebeck katsayıları Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8 : Bazı malzemelerin Platin referansında 0°C’deki Seebeck değerleri.

Yarı iletkenler	Seebeck Katsayısı	Metaller	Seebeck Katsayısı
	$\mu\text{V/K}$		$\mu\text{V/K}$
Se	900	Antimony	47
Te	500	Nichrome	25
Si	440	Molybdenum	10
Ge	300	Cadmium	7.5
n-type Bi_2Te_3	-230	Tungsten	7.5
p-type $\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300	Gold	6.5
p-type Sb_2Te_3	185	Silver	6.5
PbTe	-180	Copper	6.5
$\text{Pb}_{0.3}\text{Ge}_{0.9}\text{Se}_{0.58}$	1670	Rhodium	6.0
$\text{Pb}_{0.6}\text{Ge}_{0.6}\text{Se}_{0.58}$	1410	Tantalum	4.5
$\text{Pb}_{0.9}\text{Ge}_{0.3}\text{Se}_{0.58}$	-1360	Lead	4.0
$\text{Pb}_{1.3}\text{Ge}_{0.29}\text{Se}_{0.58}$	-1710	Aluminum	3.5
$\text{Pb}_{1.5}\text{Ge}_{0.27}\text{Se}_{0.58}$	-1990	Carbon	3.0
SnSb_4Te_7	25	Mercury	0.6
SnBi_4Te_7	120	Platinum	0
$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151	Sodium	-2.0
$\text{SnBi}_{2.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_7$	110	Potassium	-9.0
$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90	Nickel	-15
PbBi_4Te_7	-53	Constantan	-35
		Bismuth	-72

2.4.2 Peltier etkisi

Peltier etkisi, birbiriyle temas eden iki farklı iletkenin elektrik akımı geçirildiğinde akımın yönüne bağlı olarak, bağlantı bölgelerinin birinde çevreden ısı emilip diğerinde çevreden aktarılması olayıdır. Etki, 1834 yılında keşfeden Fransız fizikçi Jean Charles Athanase Peltier ‘in adıyla anılmaktadır. Peltier ısısı, süper iletkenler dışındaki tüm iletkenlerden akım geçirildiğinde oluşan Joule ısısıyla kesinlikle karıştırılmamalıdır. Joule ısısı, direkt olarak malzemenin elektriksel direnciyle ilgili, akım yoğunluğunun karesiyle doğru orantılı olan tümüyle tersinmez bir etkidir. Yani akımın doğrultusundan bağımsız olarak, daima pozitif değerde oluşan bir ısıdır.

[8]

Peltier ısısı ise malzeme üzerinden geçen elektrik akım büyüklüğüne lineer bağlı olmakla beraber, akım doğrultusuna ve sıcaklık farkına bağlı olarak bir jonksiyonda emilirken diğer jonksiyonda dışarıya verilir. Peltier ısısının akımın büyüklüğüne ve işaretine lineer olarak bağlı olması, Joule ısısıyla farklı olarak Peltier ısısının tersinir bir olgu olduğunu göstermektedir.

Düşük sıcaklıktaki jonksiyonda emilen Peltier ısısının ifadesi Denklem 2.27’de verilmiştir.

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I \quad (2.27)$$

Denklemdaki Π alt indisini aldığı materyalin, Π_{AB} ise komple sistemin Peltier katsayısını simgelemektedir. Birim olarak (W/A) şeklinde ifade edilebilir.

2.4.3 Thomson etkisi

William Thomson (Lord Kelvin) 1854 yılında Peltier ısısı ve Seebeck potansiyeli arasında termodinamik bir bağlantı olması gerektiğini düşünüp, teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda Thomson ısısını Denklem 2.28’deki şekilde tanımlamıştır. Bir iletken üzerinden J_x akım yoğunluğu geçerse, birim zamanda birim hacimde üretilen net ısı;

$$\dot{Q}_1 = \frac{J_x^2}{\sigma} - \mu J_x \frac{dT}{dx} \quad (2.28)$$

Denklem 2.28’deki birinci ifade, elektriksel iletkenliğe ve akımın karesine bağlı, sıcaklık farkından bağımsız tersinmez Joule ısısıdır. İkinci ifadedeki μ katsayısı malzemenin Thomson katsayısını simgelemektedir. Bu denklem, termoelektriğin temel denklemi olarak kabul edilir. Elektriksel yük, zaman ve iletkenin direnci cinsinden Denklem 2.29’deki şekilde yazılabilir. [8]

$$Q = \frac{q^2 R}{t} - \mu q \Delta T \quad (2.29)$$

Denklem 2.29’da yer verilen bağıntı sonrasında Lord Kelvin, Thomson, Peltier ve Seebeck katsayıları arasındaki bağıntıyı keşfetmiş ve Denklem 2.30 ve 2.31’de yer verilen bu bağıntılar Kelvin (Thomson) bağıntıları adını almıştır.

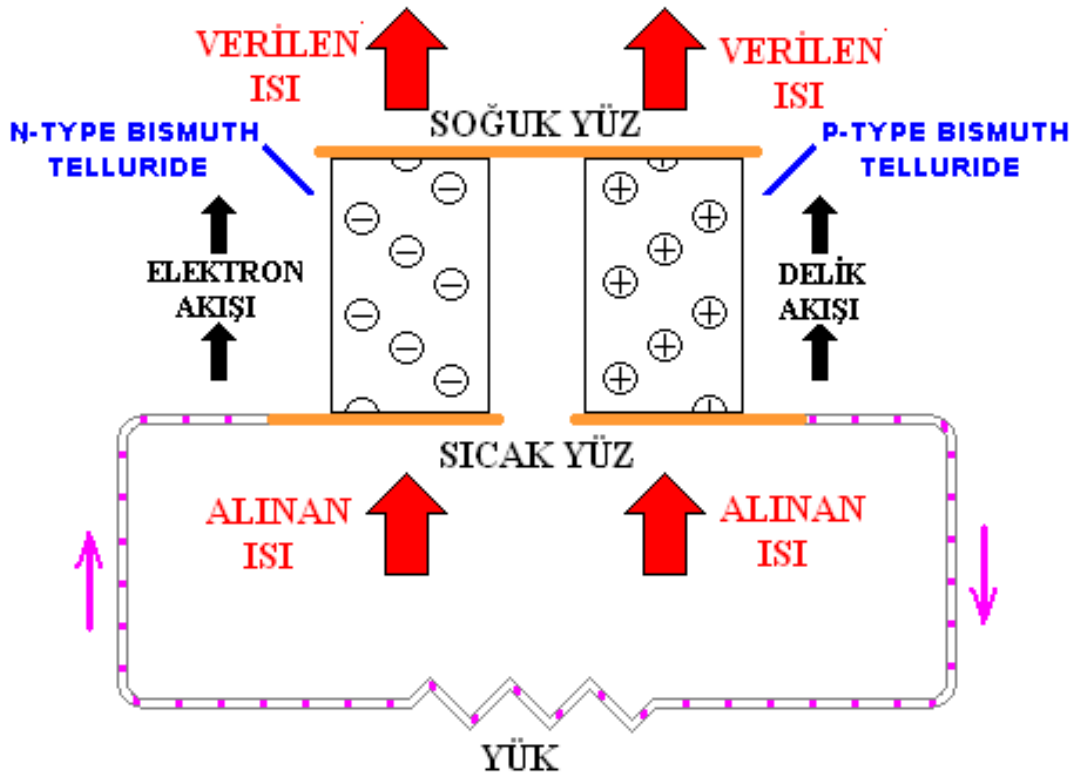
$$\mu = \frac{TdS}{dT} \quad (2.30)$$

$$\Pi = TS \quad (2.31)$$

Denklem 2.29’daki ifadenin integrali alınır, mutlak termoelektrik güç olan Seebeck katsayısı ve Thomson katsayısındaki ilişki Denklem 2.31’deki şekilde yazılabilir.

$$S(T) = \int_0^T \frac{\mu}{T} dT \quad (2.32)$$

2.4.4 Termoelektrik Bağıntılar



Şekil 2.10 : Termoelektrik jeneratör şeması.

Şekil 2.10'da termoelektrik etkinin gözlenildiği bir şemaya yer verilmiştir. Termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyinden absorbe edilen ısının denklemi,

$$\dot{Q}_{sc} = K(T_{sc} - T_{sğ}) + \alpha T_{sc} I - 0.5 I^2 R_i \quad (2.33)$$

Denklem 2.33'deki ilk ifade, Fourier ısı iletimidir. Sıcaklık farkı nedeniyle malzeme üzerinde akan ısıdır. Malzemenin p ve n tiplerinin bütünüyle termal iletkenliği,

$$K = \lambda_n \frac{A_n}{L_n} + \lambda_p \frac{A_p}{L_p} \quad (2.34)$$

Denklem 2.33'deki ikinci ifade ise Peltier ısıdır. Peltier ile Seebeck katsayıları arasındaki Kelvin bağıntısı kullanılarak denklem sadeleştirilmiştir. Üçüncü ifade ise Joule ısıdır. Akımın geçmesiyle, iletkenin iç direnci yüzünden, iletken üzerinde oluşan ısının yarısı modülün sıcak yüzüne, diğer yarısı da soğuk yüzüne gider.

$$\left(\dot{Q}_{Joule}\right)_{sc} = -\frac{1}{2} I^2 R_i \quad (2.35)$$

$$\left(\dot{Q}_{Joule}\right)_{sğ} = \frac{1}{2} I^2 R_i \quad (2.36)$$

Modülün soğuk yüzünden ortama verilen ısı ise Denklem 2.37'da verilmiştir.

$$\dot{Q}_{sğ} = K(T_{sc} - T_{sğ}) + \alpha T_{sğ} I + 0.5 I^2 R_i \quad (2.37)$$

Termoelektrik jeneratörlerin termal verimi üretilen net elektriksel gücün, sıcak yüzeyden emilen ısıya oranı olarak hesaplanır.

$$\eta_t = \frac{P}{\dot{Q}_{sc}} = \frac{I^2 R_0}{K \Delta T + \alpha T_{sc} I - \frac{1}{2} I^2 R_i} \quad (2.38)$$

Verim ifadesini açmak için devrede dolaşan akım denklemini oluşturmak gerekir. R_i modülün iç direnci, R_0 yük direncini, R_t sistem direncini simgelediğinde sistemde dolaşan akım için Denklem 2.40 oluşturulabilir.

$$R_t = R_i + R_0 \quad (2.39)$$

$$I = \frac{V_0}{R_t} = \frac{V_0}{R_i + R_0} \quad (2.40)$$

Termoelektrik modül p ve n çiftlerinden oluştuğu için modülün toplam iç direnci Denklem 2.41'deki şekilde hesaplanır.

$$R_i = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (2.41)$$

Denklem 2.39, 2.40 ve 2.41 verim ifadesi içerisine yerleştirilip, ifadeyi birimlerden kurtarmak için boyutsuzlaştırmaya gidilirse;

$$m = \frac{R_0}{R_i} \quad (2.42)$$

$$\eta_t = \frac{m \left(\frac{T_{sc} - T_{sğ}}{T_{sc}} \right)}{\frac{(1+m)^2}{T_{sc}} \cdot \frac{R_i K}{\alpha^2} + (1+m) - \frac{T_{sc} - T_{sğ}}{2T_{sc}}} \quad (2.43)$$

Denklem 43'e bakıldığında verimin termoelektrik modül malzemesinin Seebeck katsayısının karesiyle doğru, iç direnç ve termal iletkenliğiyle ters orantılı olduğu görülmektedir. Yani termoelektrik jeneratör üretimi için malzeme seçilirken, Seebeck katsayısı büyük, iç direnci ve termal iletkenliği düşük malzemeler aranır ve verim artırılmış olacaktır. Bu olgu termoelektrik malzemenin performans kriteri (Z) (figure of merit) olarak adlandırılır ve bağıntısı Denklem 2.44'te verilmiştir.

$$Z = \frac{\alpha^2}{R_i K} \quad (2.44)$$

($R_i K$) ifadesi modülün p ve n malzemelerinin iç direnç ve termal iletkenliklerinin çarpımıdır ve bu ifade Denklem 2.45'te verilmiştir.

$$R_i K = \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_p A_p}{L_p} + \frac{\lambda_n A_n}{L_n} \right) \quad (2.45)$$

Termoelektrik modülün performans kriteri değerinin yüksek olması için ($R_i K$) değerinin minimum olması gerektiği görülmektedir. Dolayısıyla Denklem 2.44'deki ifadenin türevi alınıp sıfıra eşitlenirse minimum değer bulunmuş olunacaktır.

$$(R_i K)_{\min} = \left[(\rho_n \lambda_n)^{1/2} + (\rho_p \lambda_p)^{1/2} \right]^2 \quad (2.46)$$

$$Z_{\max} = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)^2}{\left[(\rho_n \lambda_n)^{1/2} + (\rho_p \lambda_p)^{1/2} \right]^2} \quad (2.47)$$

Verim ifadesi performans kriteriyle sadeleştirilirse Denklem 2.48 elde edilir.

$$\eta_t = \frac{m \left(\frac{T_{sc} - T_{s\check{g}}}{T_{sc}} \right)}{\frac{(1+m)^2}{Z_{\max} T_{sc}} + (1+m) - \frac{T_{sc} - T_{s\check{g}}}{2T_{sc}}} \quad (2.48)$$

Bu ifadenin m 'e göre türevi sıfıra eşitlendiğinde, termal verimin maksimum olduğu değer bulunur.

$$\bar{T} = \frac{T_{sc} + T_{s\check{g}}}{2} \quad (2.49)$$

$$m_{opt} = \left(1 + Z_{\max} \bar{T} \right)^{1/2} \quad (2.50)$$

$$(\eta_t)_{\max} = \left(\frac{T_{sc} - T_{s\check{g}}}{T_{sc}} \right) \frac{(m_{opt} - 1)}{m_{opt} + \frac{T_{sc}}{T_{s\check{g}}}} \quad (2.51)$$

Maksimum güç ifadesi ise, güç denkleminin akıma göre türevi sıfıra eşitlenerek bulunur.

$$\frac{\partial P_{Yük}}{\partial I} = 0 \quad (2.52)$$

$$V_0 - 2IR_i = 0 \quad (2.53)$$

$$I = \frac{V_0}{2R_i} = \frac{V_0}{R_i + R_0} \quad (2.54)$$

$$P_{max} = \frac{V_0^2}{4R_i} \quad (2.55)$$

Gücün maksimum olması için yük direncinin, modülün iç direncine eşit olması gerektiği görülmektedir. Maksimum güç ifadesi de Denklem (2.55)'te verilmiştir.

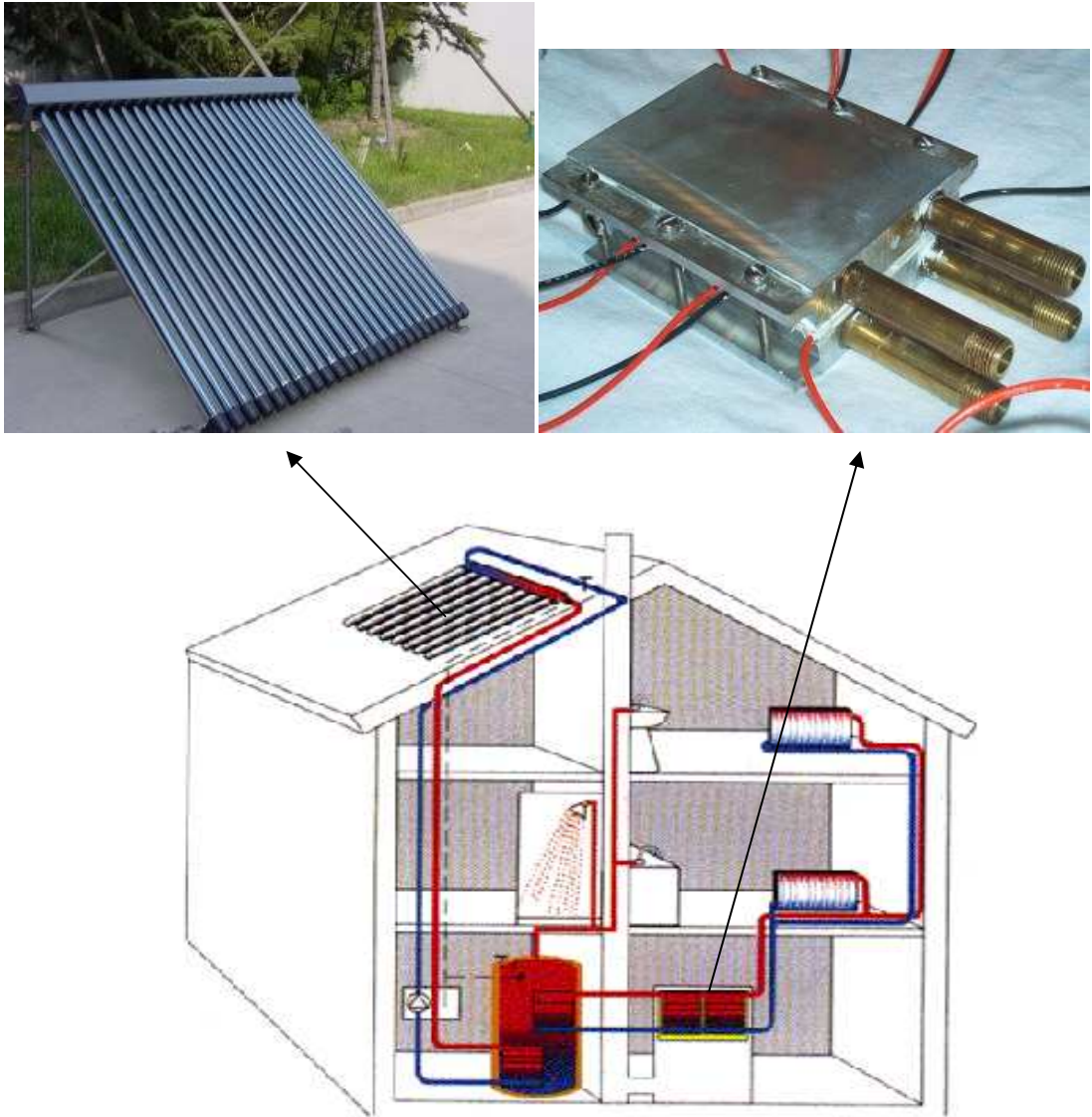
2.4.5 Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanım Alanları



Şekil 2.11 : Gaz lambası jeneratörü.

Şekil 2.11'de 1959 yılında Rusya'da üretilen bir cihaz görülmektedir. Gaz lambası jeneratörü olarak adlandırılan cihaz, gaz lambası üzerine yerleştirilmiş toplam 2 watt gücündeki termoelektrik jeneratörlerden oluşmaktadır. Termoelektrik jeneratörlerin, gaz lambası çalışırken ortama verilen atık ısıdan ürettiği elektrik enerjisi ile radyo çalıştırılmaktadır. Dolayısıyla lambanın götürüldüğü herhangi bir yerde radyo çalıştırılabilir.

Jeotermal ve güneş enerjisi kullanılarak ısıtma yapılan evlerde küçük bir ısı değiştiricisi kullanılarak termoelektrik modüllerden evin elektrik ihtiyacı da karşılanabilir. Şekil 2.12’de görülen binanın çatı katında bulunan güneş eşanjöründe ısınan suyun ısısı önce sıcak su tankına aktırılmaktadır. Tanktaki suyun bir kısmı binanın sıcak su ihtiyacında kullanılmaktadır. Binanın ısıtılması ise sıcak su tankına giren bir diğer ısı değiştiricisi ile sağlanmaktadır. Fakat ısıtma suyu ile sıcak su tankından gelen suyun arasına konan termoelektrik jeneratörlü bir ısı değiştiricisi sayesinde ev ısıtılırken aynı zamanda da elektrik enerjisi üretilmektedir.



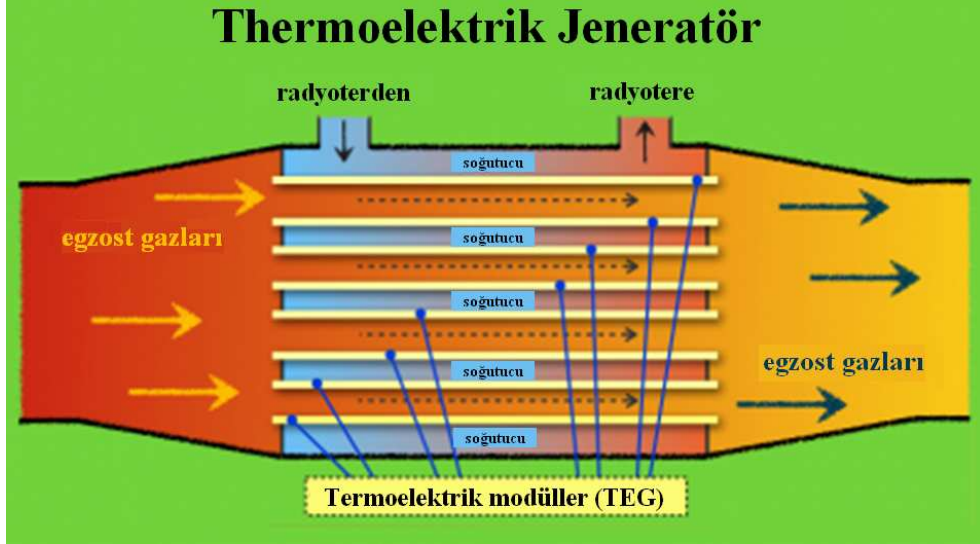
Şekil 2.12 : Jeotermal enerji ile termoelektrik jeneratör uygulamaşı.



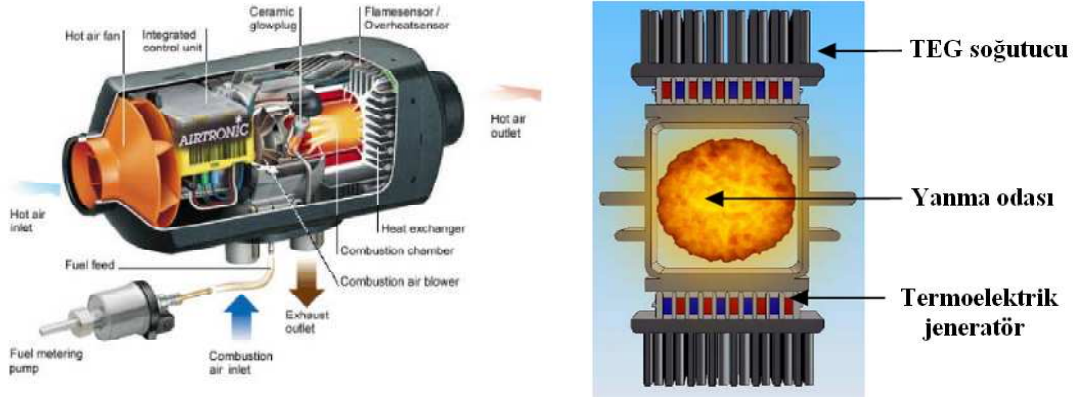
Şekil 2.13 : Vücut ısıyla Li-Po pil şarj eden bir termoelektrik uygulaması.

Şekil 2.13'te cep telefonu, mp3 çalar ve dijital kamera gibi cihazları mobil olarak şarj etmek için üretilen bir bileklik görülmektedir. İçerdiği termoelektrik modül sayesinde vücut ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkından ürettiği enerjiyi Li-Po pilde depolamaktadır. Bilekliğin yan tarafında bulunan ışıklı gösterge pilin doluluk derecesini göstermektedir. Doldurulan pildeki elektrik enerjisi, USB bağlantıyla şarj edilecek cihaza takılmaktadır. Bu sistemler geliştirildiğinde vücut ısısı gibi küçük atık ısıların kullanılması mümkün kılınacaktır.

Aşağıda termoelektrik jeneratörlerin enerji üretme amacıyla kullanım şekilleri görülmektedir. Şekil 2.14'te bir yakma sistemi sonucunda ortaya çıkan sıcak egzost gazı ile baca kanalı içerisine yerleştirilen termoelektrik jeneratörlü soğutucu üniteler arasındaki sıcaklık farkından elektrik üretilmektedir. Şekil 2.15'te ise 110 watt'lık modül içeren cihaz içerisinde yakılan yakıtla üretilen ısı, modül üzerinden akıtılarak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

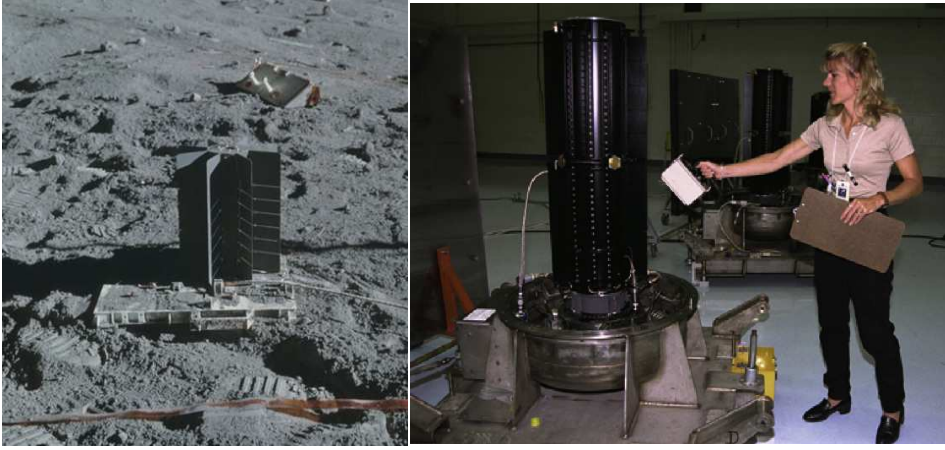


Şekil 2.14 : Sıcak egzost gazlarından TEG ile enerji üretimi.



Şekil 2.15 : Yanma odalı sıcak TEG uygulaması

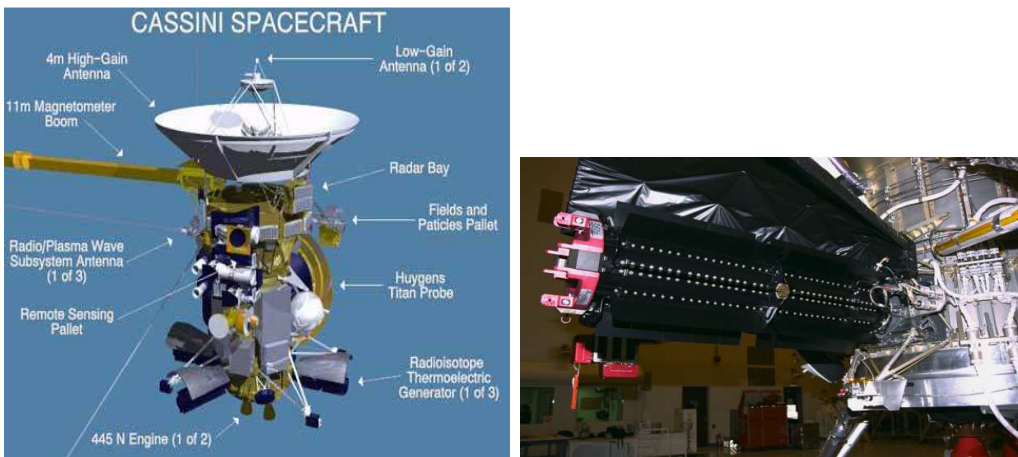
Radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG), radyoaktif materyalin bozunumu sırasında açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine dönüştüren elemanlardır. RTG'lerin uygulama alanı genelde uydular ve uzay araştırma araçları gibi herhangi bir enerji kaynağından uzak insansız tesislerdir. Güneş pilleri kullanılmayan, 100-500 watt arası gücün, kimyasal pil ve yakıt pillerinin kapasitesinden daha uzun süreli istenildiği durumlarda kullanılması uygundur. Şekil 2.16 iki RTG uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.16 : RTG uygulamaları.

RTG ünitelerinin uzay araçlarında kullanımı ilk olarak 1961 yılında, Amerika Birleşik Devletleri'ne ait Navy Transit 4A uzay aracıyla başlamıştır. Bundan sonra günümüze kadar, Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2, Galileo, Ulysses, Cassini ve New Horizons gibi birçok uzay aracında RTG'lere yer verilmiştir. Şekil 2.17'de 15 Ekim 1997'de Satürn gezegeni ve uydularının araştırılması için uzaya gönderilen insansız uzay aracı Cassini ve üzerindeki RTG üniteleri görülmektedir.

RTG ünitesinde kullanılacak radyoaktif materyalin seçiminde bazı kriterlere göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Başta yarılanma süresinin, istenildiği süre boyunca kesintisiz güç sağlayabilecek kadar uzun, istenilen güç kapasitesini karşılayabilecek kadar kısa olması gerekmektedir. İkincil olarak kütle ve hacimsel olarak enerji yoğunluğu yüksek olmalıdır. Üçüncül olarak da, termal radyasyona rahat transfer edilebilen alfa gibi yüksek enerjili bir ışınım yapan bir malzeme ise RTG ünitesi için uygun olarak düşünülür.

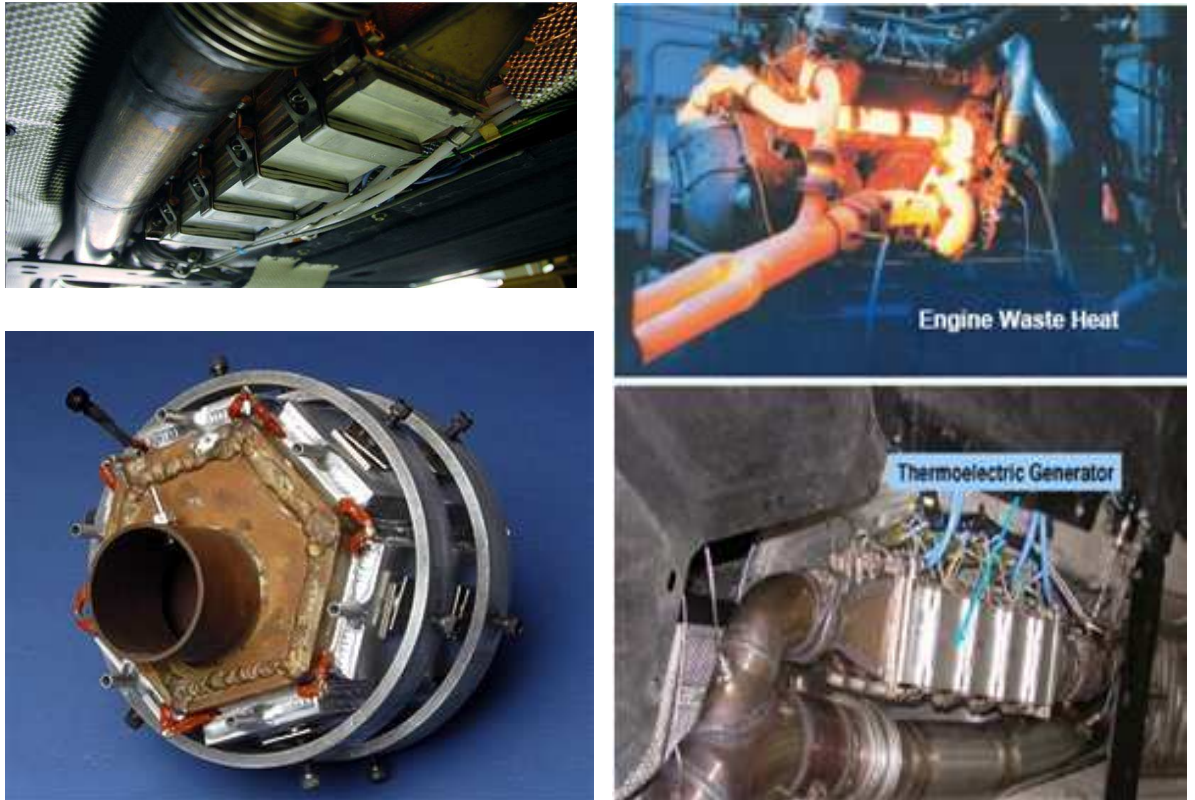


Şekil 2.17 : Cassini uzay aracı ve üzerindeki RTG ünitesi.

Otomotiv termoelektrik jeneratörleri (ATEG), içten yanmalı motorlu aracın atık ısısından elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. Tipik bir ATEG ünitesi; sıcak taraf ısı değiştiricisi, soğuk taraf ısı değiştiricisi, termoelektrik jeneratörler ve sıkıştırmalı montaj sistemi olmak üzere dört ana elemandan oluşmaktadır. Genelde sıcak taraf ısı değiştiricisinde, motor egzostunun ısısı termoelektrik jeneratörlerin yüzeyine aktarılır. Soğuk taraf ısı değiştiricisinde ise termoelektrik üzerinden akan ısı, motor soğutma suyuna aktarılır. Şekil 2.18'de ATEG uygulamaları görölmektedir.

ATEG uygulamalarının verimi; termoelektrik jeneratörlerin dönüşüm verimi, sıcak ve soğuk taraftaki ısı değiştiricilerinin verimleri ve termoelektrik modüller üzerinden geöen ısının modülleri by-pass eden ısıya oranının çarpılmasıyla elde edilir.

Volkswagen'in Golf Plus modeline yerleştirdiği ATEG üniteleri sayesinde, atık ısıdan aracın elektrik ihtiyacının %30'u olan 600 Watt elektrik gücü üretilmiş ve bu uygulamanın yakıt tüketiminde %5'lik düşüş sağlayacağı öne sürölmüştür. BMW ise benzer bir sistem ile 200 Watt elektrik gücü üreterek ödöller kazanmıştır. GM ise araçlarına koyacağı ATEG sistemleriyle %10 yakıt tasarrufu elde etmeyi planlamaktadır.



Şekil 2.18 : Otomotivde termoelektrik uygulamaları.

2.4.6 Enerji Depolama Teknolojileri

Her teknolojinin, onu sadece sınırlı bir uygulama alanı için pratik ve ekonomik kılan, kendine özgü sınırlamaları ve dezavantajları vardır. Teknolojilerin güç ve enerji uygulamaları için uygunluk, avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.9’da verilmiştir. [22]

Çizelge 2.9 : Enerji depolama teknolojilerinin avantaj ve dezavantajları.

<i>Depolama Teknolojileri</i>	<i>Ana Avantajlar</i>	<i>Dezavantajlar</i>	<i>Güç Uygulamaları</i>	<i>Enerji Uygulamaları</i>
<i>Pompanmış Depo</i>	Yüksek kapasite, düşük maliyet	Özel mekan gerekliliği	Ne fizibil ne de ekonomik	Uygulanabilir ve mantıklı
<i>Sıkıştırılmış Hava (CAES)</i>	Yüksek kapasite, düşük maliyet	Özel mekan gerekliliği, gaz yakıt ihtiyacı	Ne fizibil ne de ekonomik	Uygulanabilir ve mantıklı
<i>Akış Pilleri</i>	Yüksek kapasite, bağımsız güç ve enerji verimleri	Düşük enerji yoğunluğu	Mantıklı	Uygulanabilir ve mantıklı
<i>Metal-Hava Pilleri</i>	Çok yüksek enerji yoğunluğu	Elektrik şarj zorluğu	Ne fizibil ne de ekonomik	Uygulanabilir ve mantıklı
<i>NaS Piller</i>	Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, yüksek verim	Üretim maliyeti, güvenlik kaygıları	Uygulanabilir ve mantıklı	Uygulanabilir ve mantıklı
<i>Li-ion Piller</i>	Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, yüksek verim	Yüksek üretim maliyeti, özel şarj devresi gereksinimi	Uygulanabilir ve mantıklı	Fizibil ama pratik yada ekonomik değil
<i>Ni-Cd Piller</i>	Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, yüksek verim		Uygulanabilir ve mantıklı	Mantıklı
<i>Kurşun-Asit Piller</i>	Düşük yatırım maliyeti	Tamamıyla deşarj edildiğinde sınırlı çevrim ömrü	Uygulanabilir ve mantıklı	Fizibil ama pratik yada ekonomik değil
<i>Diğer Gelişmiş Piller</i>	Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, yüksek verim	Yüksek üretim maliyeti	Uygulanabilir ve mantıklı	Fizibil ama pratik yada ekonomik değil
<i>Döner Volan</i>	Yüksek güç	Düşük enerji yoğunluğu	Uygulanabilir ve mantıklı	Fizibil ama pratik yada ekonomik değil
<i>Süper iletken Manyetik (SMES ve DSMES)</i>	Yüksek güç	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek üretim maliyeti	Uygulanabilir ve mantıklı	Ne fizibil ne de ekonomik
<i>Elektrokimyasal kapasitörler</i>	Uzun çevrim ömrü, yüksek verim	Düşük enerji yoğunluğu	Uygulanabilir ve mantıklı	Mantıklı

2.4.6.1 Sistem derecelendirmeleri

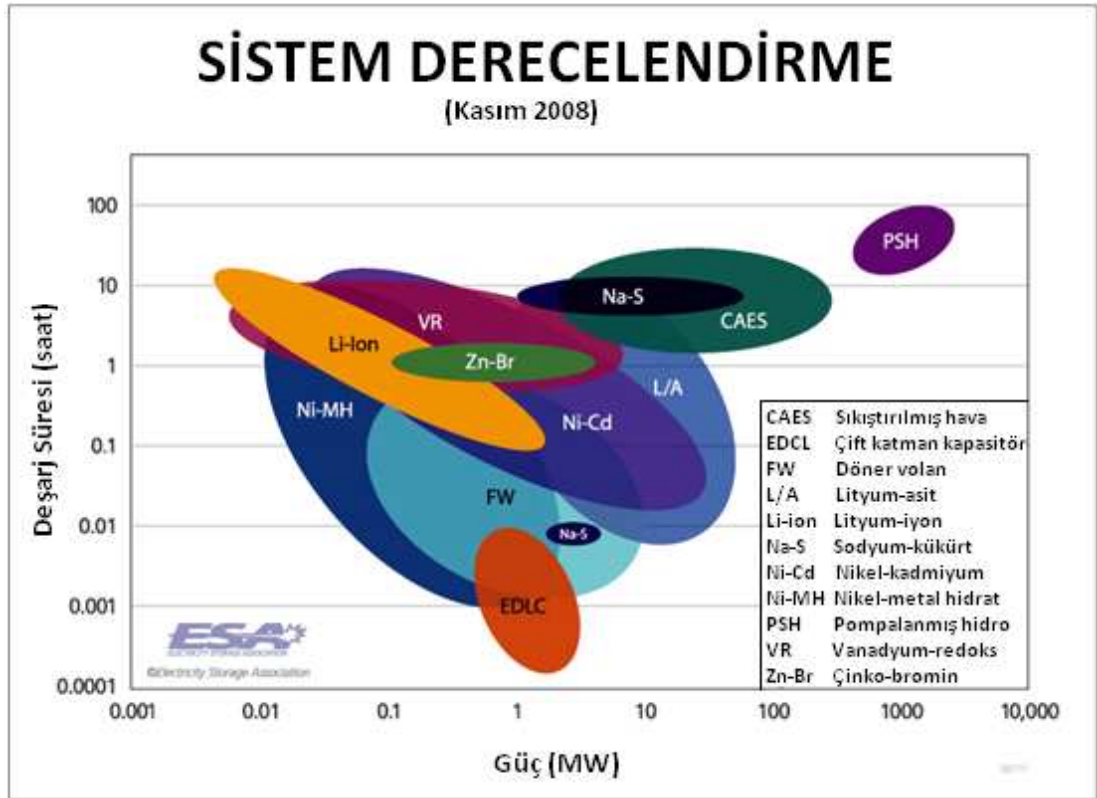
Büyük ölçekli sabit enerji depolama uygulamaları üç ana fonksiyonda kategorize edilebilir;

Güç Kalitesi : Güç kalitesinin önemsendiği uygulamalarda depolanan enerji, güç kalitesinin sürekliliğinden emin olunması için saniye ile ifade edilebilecek sürelerce saklanır.

Köprüleme Gücü : Bu tür uygulamalarda depolanan enerji, bir enerji üretim kaynağından diğerine geçerken servis sürekliliği sağlamak için birkaç saniye yada dakika boyunca saklanır.

Enerji Yönetimi : Elektrik enerjisi tüketimi, üretildiği zamanda olmayacaksa bu tür uygulamalara başvurulur. Amaç depolama olduğu için enerjiyi ne kadar uzun süre saklanabiliyorsa sistem o kadar başarılıdır.

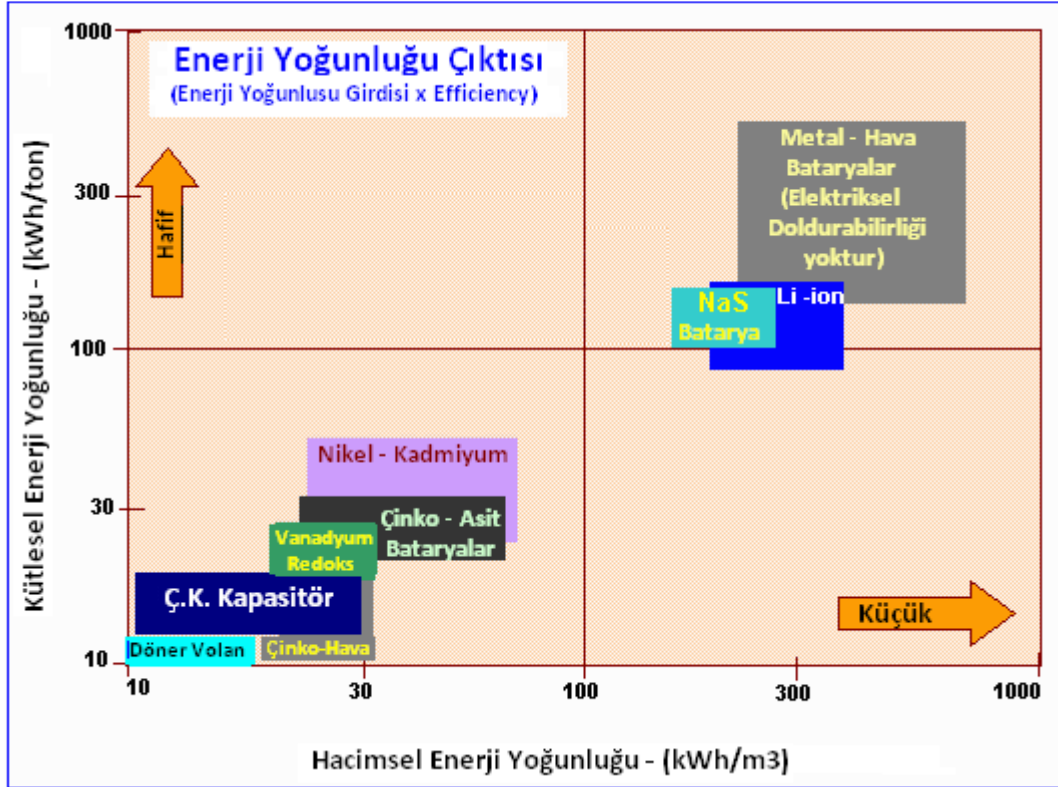
Bazı depolama teknolojileri birden fazla fonksiyonda kullanılabilirse bile, çoğu zaman aynı teknolojinin üç fonksiyonda birden kullanılması ekonomik olmayacaktır. Şekil 2.19’da teknolojilerin deşarj süresi – güç grafiği verilmiştir.



Şekil 2.19 : Enerji depolama teknolojilerinin deşarj süresi – güç grafiği.

2.4.6.2 Boyut ve ağırlık

Depolama yöntemlerinin boyut ve ağırlığı önemli bir özelliktir. Şekil 2.20’de teknolojilerin enerji yoğunlukları verilmiştir. Metal – Hava pilleri bu grafikteki enerji yoğunluğu en yüksek olan teknolojidir. Çinko – Hava pilleri gibi elektriksel olarak yeniden doldurulabilir teknolojiler, enerji yoğunluğu düşük ve diğer teknolojilere göre çevrim ömrü kısa olmasına rağmen gelişim içindedir. [22]



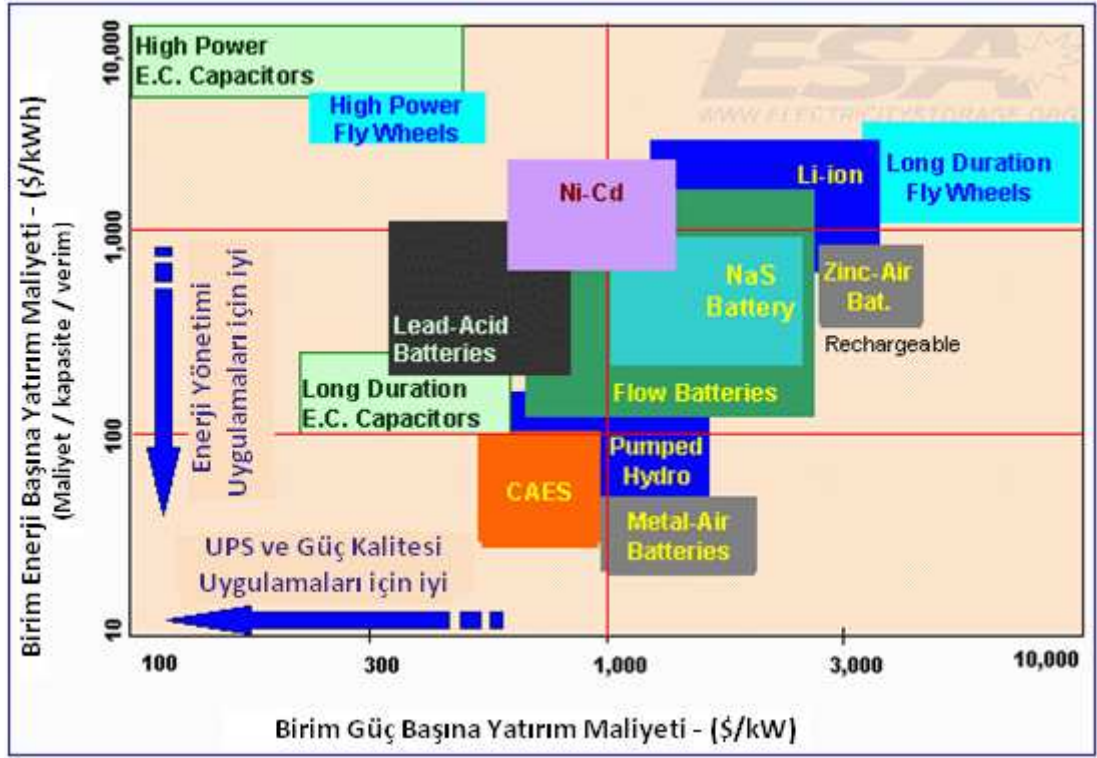
Şekil 2.20 : Enerji depolama teknolojilerinin enerji yoğunlukları.

2.4.6.3 İlk yatırım maliyeti

İlk yatırım maliyeti önemli bir parametre olsa da, işletme ve bakım maliyetleriyle birlikte toplam bir maliyet olarak incelenmesi daha doğrudur. Örnek olarak kurşun-asit pillerin ilk yatırım maliyetleri çok düşük olsa da, düşük ömürlerinden dolayı enerji yönetimi açısından ekonomik bir seçim olmayabilir.

Depolama teknolojilerinin maliyetleri Şekil 2.21’deki grafikte birim gücün ve enerjinin maliyeti olarak yer almaktadır. Net enerji maliyeti için, depolanan enerji maliyeti depolama verimine bölünmüştür.

Kurulum maliyetleri depolamanın tipi ve boyutuna göre değişmektedir o yüzden Şekil 2.21’deki grafik detaylı bir bilgi değil sadece bir yol göstericidir.



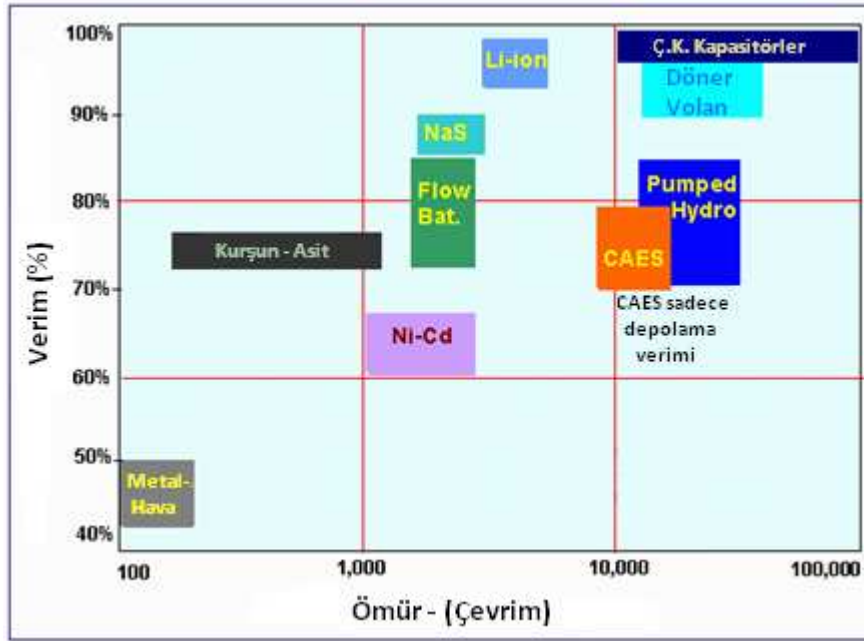
Şekil 2.21 : Enerji depolama teknolojilerinin maliyet grafiği.

Depolama teknolojilerinin maliyetleri, teknoloji evrimleştikçe değişmektedir, grafikteki değerler 2002 yılının verileridir.

Metal – hava piller, yüksek enerji yoğunluğu ve birim enerji başına düşük maliyetiyle, enerji yönetimi için en iyi seçim gibi görünse de, şarj edilebilir tipleri kısa ömürlüdür ve gelişim aşamasındadır. [22]

2.4.6.4 Ömür Verimi

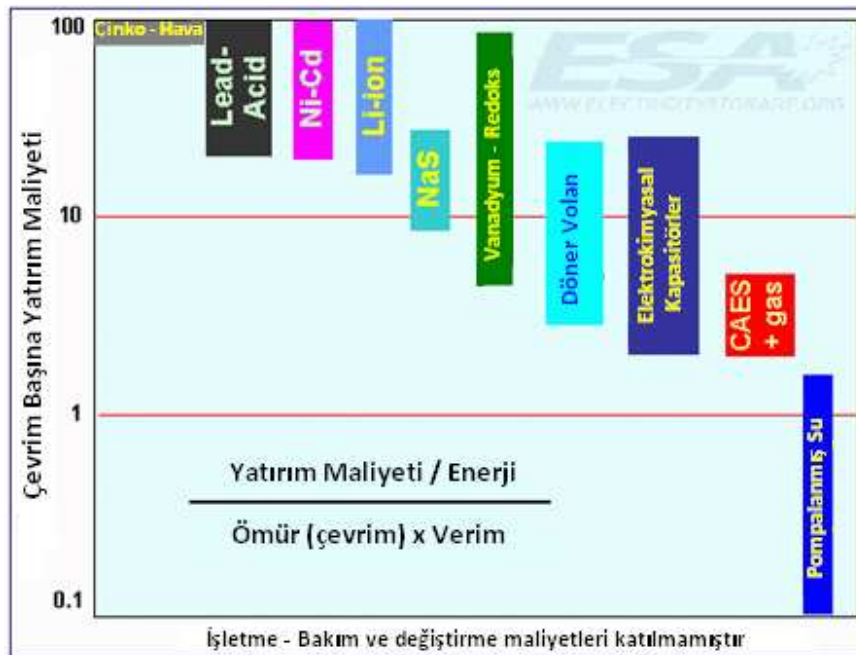
Depolama teknolojileri seçilirken, ilk bakılması gereken parametreler verim ve çevrim ömrüdür. Bu iki parametre de toplam depolama maliyetini etkilemektedir. Düşük verim, net enerji maliyetini arttırmaktadır. Düşük çevrim ömrü ise ömür tükendiğinde ünitenin değiştirilmesi gerektiğinden toplam maliyeti arttıracaktır. Bu değerler ekonomiklik gözden geçirilirken yatırım ve işletme maliyeti gibi değinilmesi gereken parametrelerdendir. Şekil 2.22’de depolama teknolojilerinin verim – ömür grafiği verilmiştir.



Şekil 2.22 : Enerji depolama teknolojilerinin verim – çevrim ömür grafiği.

2.4.6.5 Birim çevrimin maliyeti

Yük tesviyesi gibi sık şarj - deşarj içeren uygulamalar için depolama teknolojisi seçilirken en iyi yol birim çevrimin maliyetinin incelenmesidir. Şekil 2.23'teki grafikte sadece çevrim ömrü ve verim etkisi dikkate alınmıştır. Daha detaylı bir analiz için ilk yatırım, işletme, bakım, bertaraf, yenileme ve diğer maliyetler bütünüyle incelenmelidir.

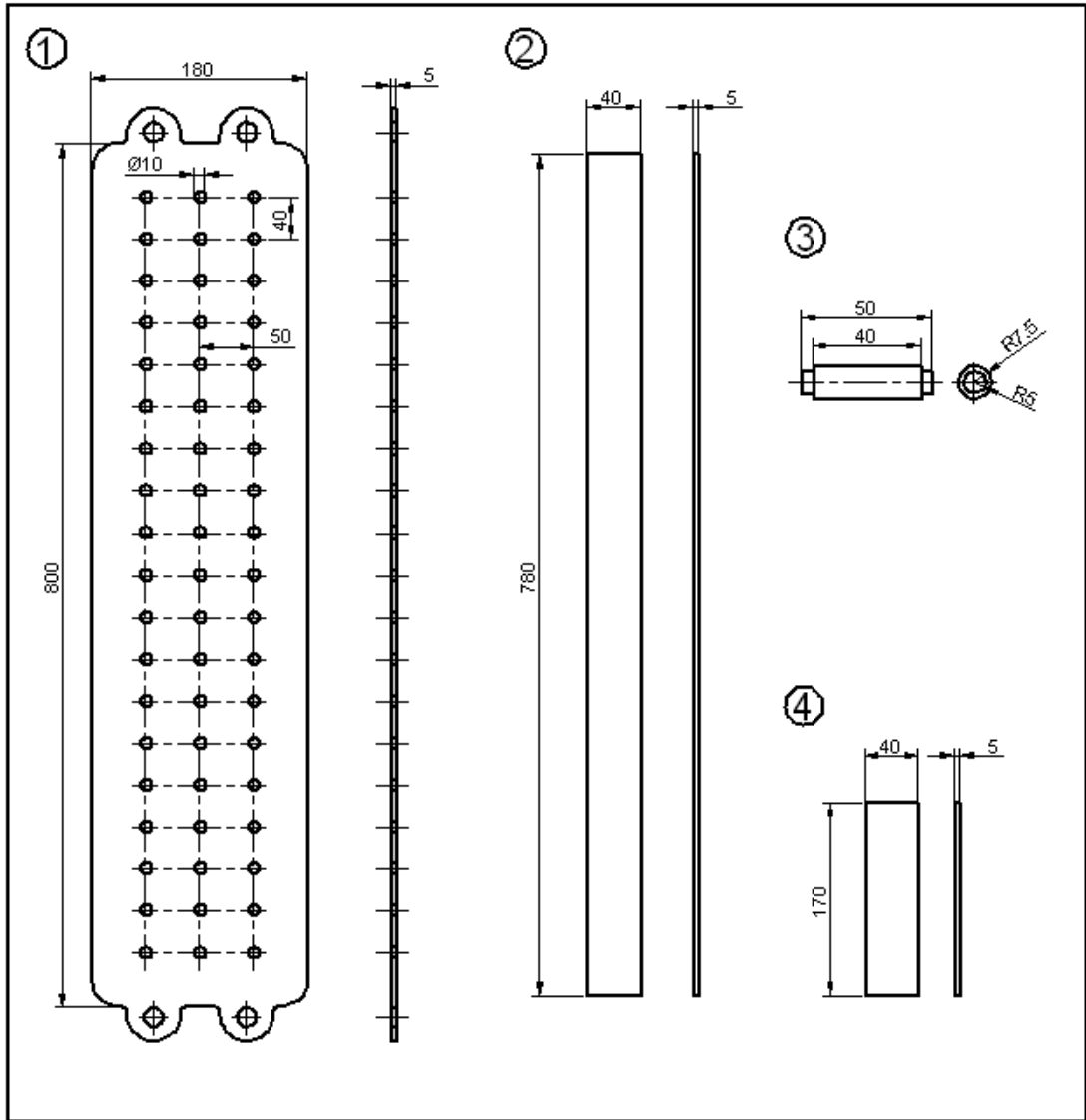


Şekil 2.23 : Enerji depolama teknolojilerinin çevrim maliyet grafiği.

3. KRIYOJENİK DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI

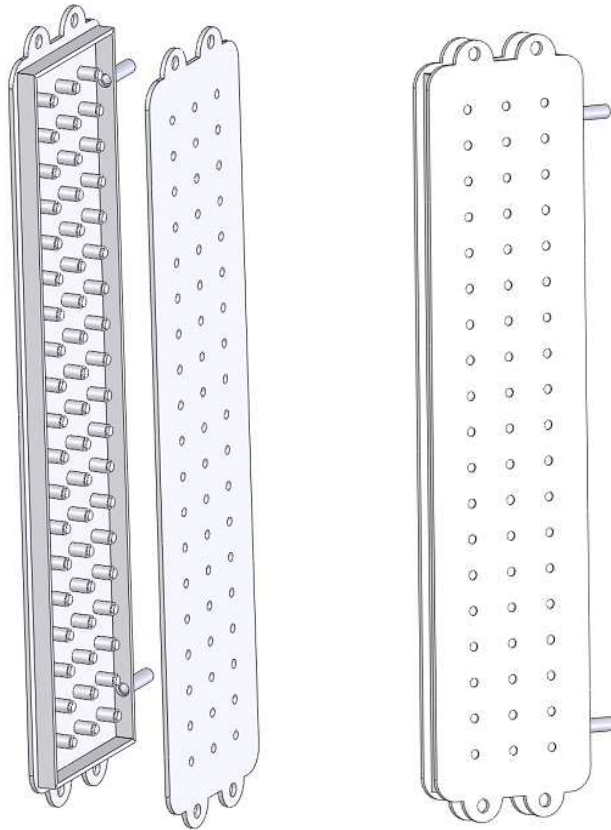
3.1 Kriyojenik Isı Değiştiricisinin Özellikleri

Deneyde kullanılacak ısı değiştiricisi, Arıtış Basınçlı Kaplar A.Ş. tarafından tez çalışması öncesi imal edilmiş ve istenilen debi ve basınçtaki sıvı azotun akışını sağlayabilecek, 4 yüzü ısıl kaçaklar önlenilebilecek şekilde dar, 2 yüzü ise düz ve termoelektrik jeneratörler ile kanatçıklı yüzeyin montajı için uygundur.



Şekil 3.1 : Isı değiştirici parçalarının ölçüleri.

Şekil 3.1’de ısı değiştirici parçalarının ölçüleri görölmektedir. 1, 2 ve 4 parçalarından ikişer tane vardır. 1 numaralı parçalar ısı değiştiricinin ön ve arka yüzeyini, 2 numaralı parçalar iki yan yüzeyi, 4 numaralı parçalar ise üst ve alt yüzeyini oluşturmaktadır. Resimdeki 3 numaralı parça ise pimi göstermektedir. 1 numaralı parçalar üzerindeki deliklere takılan 57 adet pim, montaj sonrasında alınlarından tek tek kaynatılarak, sisteme 35 bar basınca dayanacak mukavemeti sağlar. Parçalar AISI 304 paslanmaz çelik olup, tüm kaynakları argon kaynağı ile yapılmıştır. Pim alınları kaynakla doldurulduktan sonra dikkatlice taşlanıp yüzeyler düz ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Isı değiştiricisine giriş çıkış ağzı için 25.4 mm (1”) çapında manşonlar kaynatılmıştır. 1 numaralı parçaların alt ve üstünde ikişer adet bulunan kulaklar ise ısı değiştiricisinin dik konumda montajını sağlayacaktır. Isı değiştiricinin montaj edilimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Isı değiştiricisinin montaj görünümü.

Isı değiştiricinin özellikleri izelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Isı değiştiricisinin zellikleri.

Isı Değiştirici zellikleri	Değerler
Boyutları	780 x 170 x 50
Malzemesi	AISI 304
Maks. Sıvı Azot Debisi	100 m ³ /h
Maks. Çalışma Basıncı	35 bar
Isı Transfer Yüzey Alanı	0.265 m ²
Maksimum alışma Sıcaklığı	700°C
Minimum alışma Sıcaklığı	-

Isı değiştiricinin ısıl kapasitesi üzerine konulacak termoelektrik jeneratör, ısıl ve elektriksel izolasyon elemanları, ısı pastası ve kanatçıklı yüzey ile beraber bütün olarak incelenecektir. Isının en zor iletileceği nokta havadan ısının emilimi olacağından, ısıl kapasiteyi kanatçıklı yüzeyin belirleyeceği öngörülmektedir.

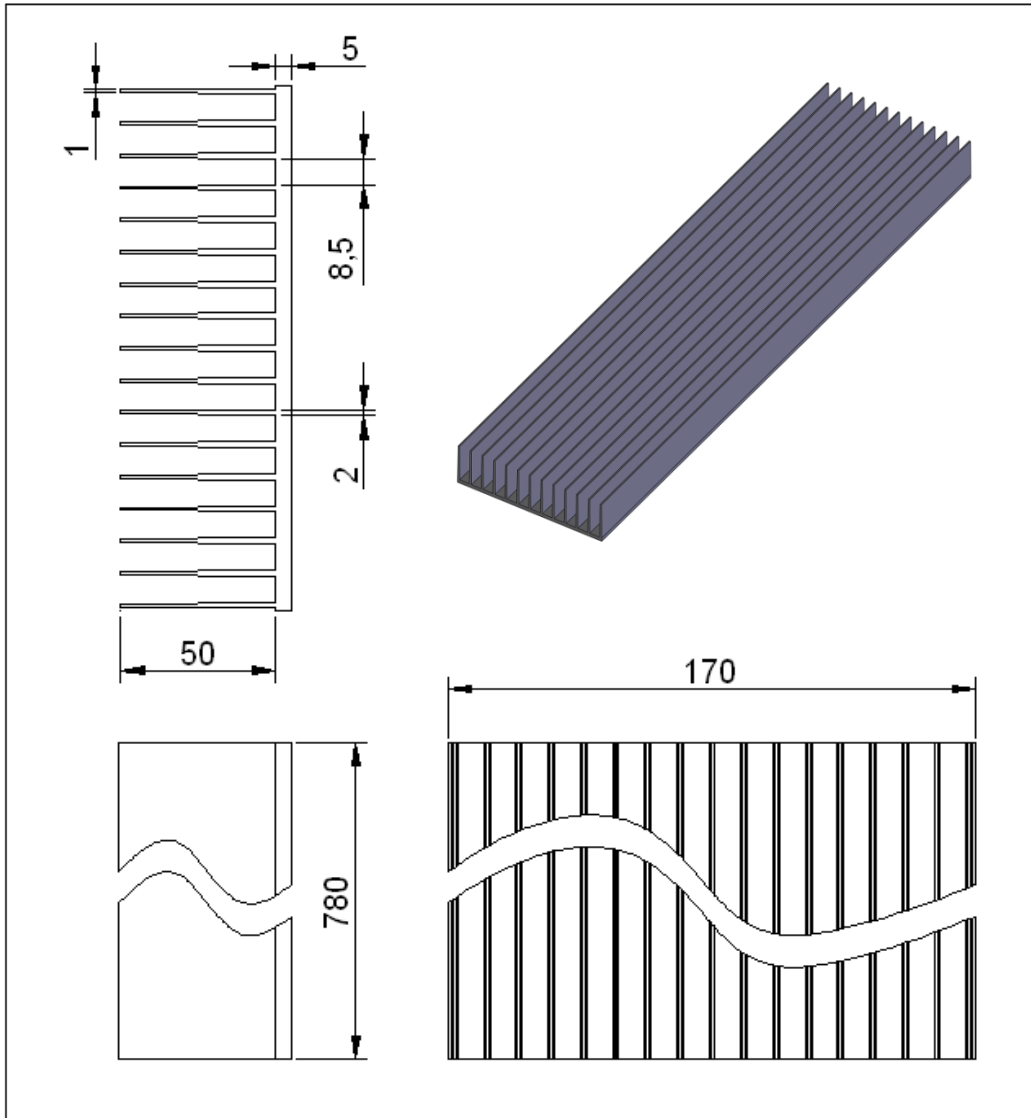
Çalışma esnasında ısı değiştiricisi ve kanatçıklı yüzey üzerinde nem yoğuşumu, hatta buzlanma görüleceğinden, ısı değiştiricisinin altına bir kondens kabı monte edilmiştir. şekil 3.3’te ısı değiştiricisinin görülmektedir.



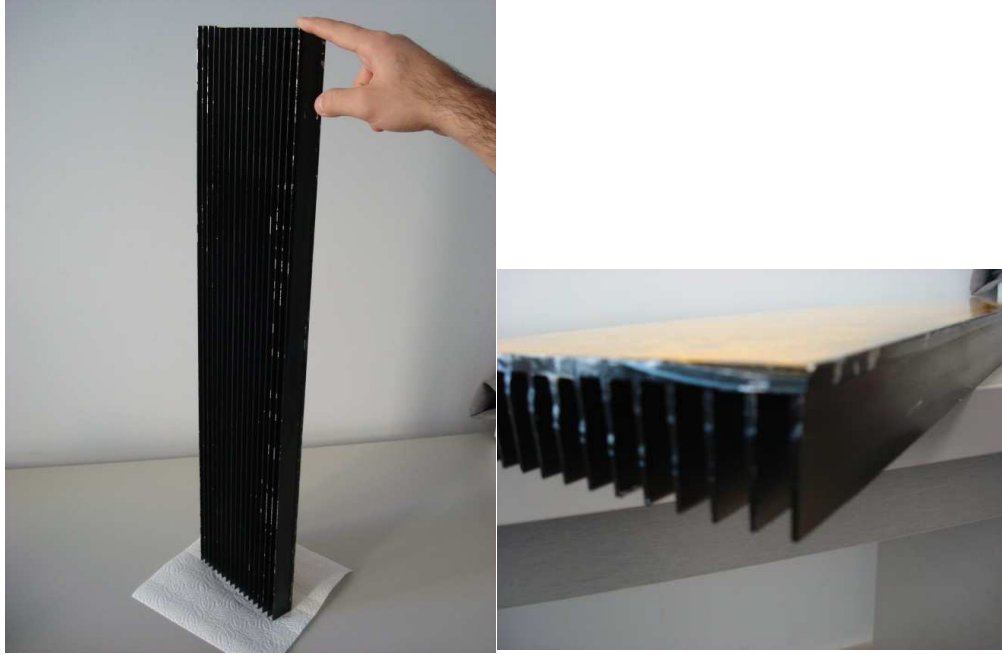
şekil 3.3 : Paslanmaz ısı değiştiricisi.

3.2 Kanatçıklı Yüzeyin Parametreleri

Kanatçıklı yüzey, alüminyum ekstrüzyon ile imal edilip istenilen boyda kesilmiştir. Deneyde kullanılacak kanatçıklı yüzey de dizayn neticesinde imal edilmiş değil, Arıtaş firmasının verdiği mevcut bir elemandır. Dizayn neticesinde ekipmanın yüzey transfer alanı olması gerekenden çok daha düşük olmasına rağmen, zaman ve imkan darlığı nedeniyle deneyler bu eleman ile yapılmıştır. Kanatçıklı yüzeyin ölçüleri Şekil 3.4’te, görüntüsüne ise Şekil 3.5’te yer verilmiştir.

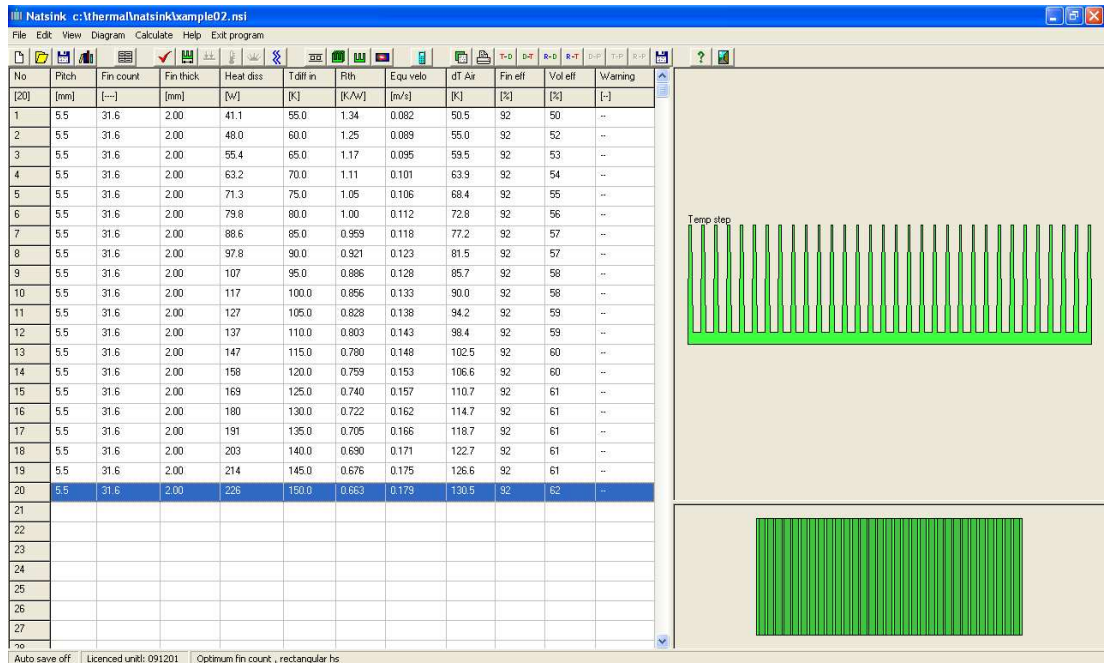


Şekil 3.4 : Kanatçıklı yüzeyin ölçüleri.



Şekil 3.5 : Kanatçıklı yüzey.

Kullanılan kanatçıklı yüzeyin malzemesi 300-100K arasındaki termal iletkenlik katsayısı 240 W/mK olan alüminyumdur. Doğal taşınım ile bu boyutlardaki bir kanatçıklı yüzeyin termal direnci Frigus Primore firmasının Natsink isimli programına hesaplatılmıştır (Şekil 3.6).



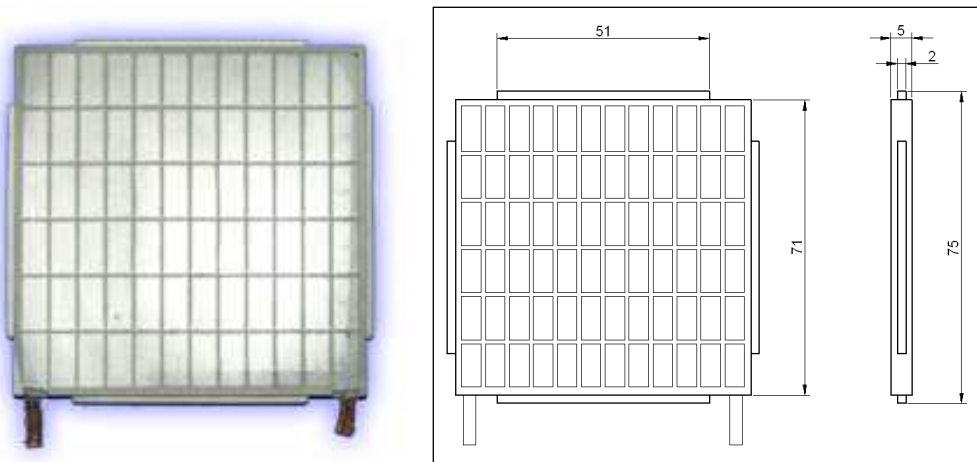
Şekil 3.6 : Natsink programından bir görüntü.

Bir kanatçıklı yüzey elemanının termal direnci 0.06375 K/W olarak bulunmuştur. Yani kanatçıklı yüzey üzerinde 100 K sıcaklık farkı uygulanırsa, tüm yüzeyde havadan emilen ısının miktarı 1568.6 Watt olmaktadır. Maksimum güç alınabilmesi bir termoelektrik jeneratör üzerinden geçen ısının 540 Watt olması gerektiği düşünülürse on tane termoelektrik modül ve izolasyon malzemesi üzerinden geçen 1600 Watt ısının çok düşük kalacağı görülmektedir. Bu nedenle doğal taşınım yerine süreci zorlanmış taşınım ile iyileştirme gereği vardır.

Ayrıca kanatçıklı yüzeyin termal direnci hesaplanırken buzlanma faktörü de hesaba katılmamıştır. Sürekli rejime geçildiğinde kanat ucundaki sıcaklığın zaman içerisinde düşeceği ve buzlanma oluşacağı aşıkardır. Buzlanma termal direnci arttıracak dolayısıyla yüzeyden geçecek ısı düşecektir. Termoelektrik modüller üzerinden maksimum gücün alınabilmesi için farklı bir ısı değiştirici ve kanatçıklı yüzey dizaynı yapılması gerektiği görülmektedir. Örneğin kanat boylarının daha uzun, kanatların daha ayırık ve kanatların dikey, kanatçıklı yüzeyin ise dikey yerine yatay durması da taşınımı iyileştirici etki yapılacaktır. Bununla birlikte tez çalışması sürecinde laboratuvar ortamında bulunan bu ısı değiştiricisi kullanılmıştır.

3.3 Termoelektrik Jeneratörlerin Özellikleri

Çalışmada kullanılacak olan termoelektrik modüller Hi-Z Technology Inc. firmasının HZ-20 adlı ürünüdür. HZ-20 modülü elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlı 71 termokupldan oluşmaktadır. Termokupllar Bismuth Telluride tabanlı yarı iletkenlerdir. HZ-20 modülünün görünümü ve boyutları Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7 : Termoelektrik modülün görüntüsü ve ölçüleri.

Deneyimizde 20 adet kullanılacak modüllerin iki ucu arasındaki sıcaklık farkının 100 K olacağı ön görülürse, her biri 4.75 Watt olmak üzere 95 Watt elektrik gücü üretilmesi amaçlanmaktadır. HZ-20 modülünün fiziksel, termal ve elektriksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

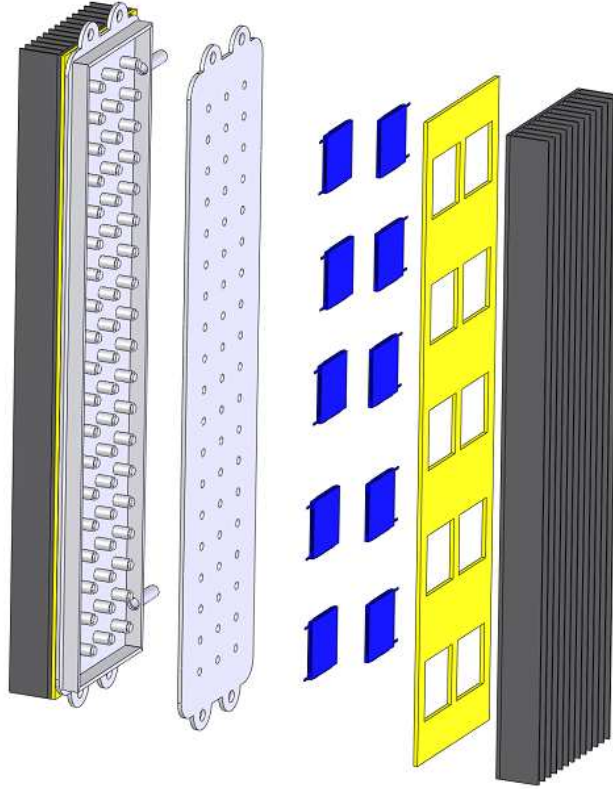
Çizelge 3.2 : HZ-20 termoelektrik modülünün özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değer	Tolerans
En ve Boy	75 mm	±0.25 mm
Kalınlık	5.08 mm	±0.25 mm
Ağırlık	115 gr	±3 gr
Maks. Basma Dayanımı	70 Mpa	minimum
Aktif Çift Sayısı	71 çift	----
Termal Özellikler		
Sıcak Yüz Dizayn Sıcaklığı	230°	±10
Soğuk Yüz Dizayn Sıcaklığı	30°	±5
Maks. Uzun Süreli Sıcaklık	250°	----
Min. Uzun Süreli Sıcaklık	yok	----
Maks. Ani Sıcaklık	400°	----
Termal İletkenlik*	0.024 W/cm-K	±0.001
Isı Akısı *	9.54 W/cm ²	±0.5
Elektrik Özellikler **		
Güç	19 Watt	minimum
Yük Altında Voltaj	2.38 Volt	±0.1
İç Direnç	0.3 Ω	±0.05
Akım	8 A	±1
Açık Devre Voltajı	5.0 Volt	±0.3
Verim	4.50%	minimum
* Dizayn sıcaklıklarındaki değerler		
** Jeneratör olarak çalıştığındaki elektriksel özellikleri		

Modüllerin katalog verisinde kalınlık toleransı ± 0.25 mm olarak verilmişse de, deneyde kullanılacak modüller incelendiğinde, bazı modüllerde yüzey bozukluğu, kalınlığı 1mm kadar değiştirecek boyutlardadır. Hatta bazı p - n çiftlerinde lokal çıkıntılar olduğu gözlenmiştir. Bu bozukluk tüm yüzeyde bir çıkıntı oluşturacağından termal temas direncini büyük ölçüde arttıracaktır.

3.3.1 Deneysel Ölçüm Sistemi

Ölçüm sisteminin oluşturulması, kriyojenik ısı değiştiricisi üzerine deney düzeneğinin yerleştirilmesiyle başlamıştır. Oluşturulacak düzeneğin ana planı Şekil 3.8’de görüldüğü üzere, paslanmaz kriyojenik ısı değiştiricisinin iki yüzeyine termoelektrik modüller, modüllerin boş bıraktığı yerlere modül kalınlığında ısıl izolasyonu sağlayacak malzeme, modül ve izolasyonun üzerine ise havayla ısı temas yüzeyinin arttırılması için kanatçıklı yüzeylerin yerleştirilmesidir.



Şekil 3.8 : Deney düzeneği teorik montaj modeli.

Kanatçıklı yüzeylerden emilen ısının büyük kısmının termoelektrik modüllerin üzerinden geçmesi istenildiğinden, ısı değiştiricisi yüzeyine termoelektrik modüllerin kaplamadığı yerlere ısıl izolasyon uygulanmıştır. Deneyimizde izolasyon malzemesi olarak 5mm kalınlığında Depron adlı yoğun kapalı hücre ekstrüde polistren izolasyon levhası kullanılmıştır. Bilinen diğer köpük izolasyondan farkı yüksek yoğunluğuna rağmen hafif olması ve aynı balsa gibi lif yönü olmasıdır. Şekil 3.9’da Depron malzemesi, Çizelge 3.3’te ise Depron malzemesinin özellikleri görülmektedir.



Şekil 3.9 : Depron polistren köpük.

Çizelge 3.3 : Depronun özellikleri.

Özellik	Değer
Kalınlığı	5mm
Yoğunluğu	33 kg/m ³
Termal İletkenliği	0.035 W/mK
Termal Direnci	0.15 m ² .K/W
Çalışma Sıcaklığı	-60 / +70 °C
Su Emilimi	< 0.1 (vol%)

Şekil 3.8’de belirtilen teorik montaj plana ek olarak, deneyimizde iki eleman daha kullanılmıştır. Termoelektrik modüller genelde, mika veya seramik plaka ile yüzeyleri elektriksel olarak yalıtılmış şekilde satılırlar. Ama deneyde kullanılacak olan HZ-20 termoelektrik modüller deneyim amaçlı yalıtımsız olarak satın alınmıştır. Dolayısıyla termoelektrik modülleri elektriksel olarak yalıtacak, fakat ısıl iletkenliği iyi bir malzemenin deney düzeneğine eklenmesi gerekmektedir. Ek elemanlardan birincisi olan bu yalıtkan, DuPont Firmasının ürettiği Kapton adındaki poliamid filmidir. Şekil 3.10’da Kapton film görülmektedir.

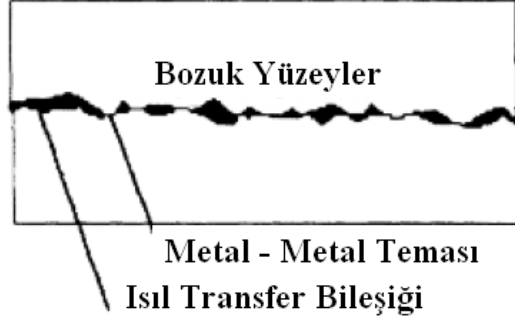


Şekil 3.10 : Kapton Filmi.

Kapton filmi ince, ısı iletkenliği yüksek ve iyi bir yalıtkan olmasıyla beraber düşük sıcaklıklarda hiçbir deformasyon göstermediğinden kriyojenik çalışmalarda çok kullanılan bir malzemedir. Deneyde kullanılacak Kapton filminin özellikleri izelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Kapton[®] 100 HN Film 25 μm (1 mil) malzemesinin özellikleri.

zellikleri	Değerler
Kalınlık	0.025 mm
Maks. Basma Dayanımı	231 MPa
Yoğunluk	1.42 g/ml
Düşük Sıcaklıklarda Esnek alışma	Olumlu
Oda Sıcaklığında Termal İletkenlik	0.12 W/mK
Özgöl Isısı	1.09 J/g.K



Şekil 3.11 : Bozuk yüzey görünümü ve silikon ısı pastası.

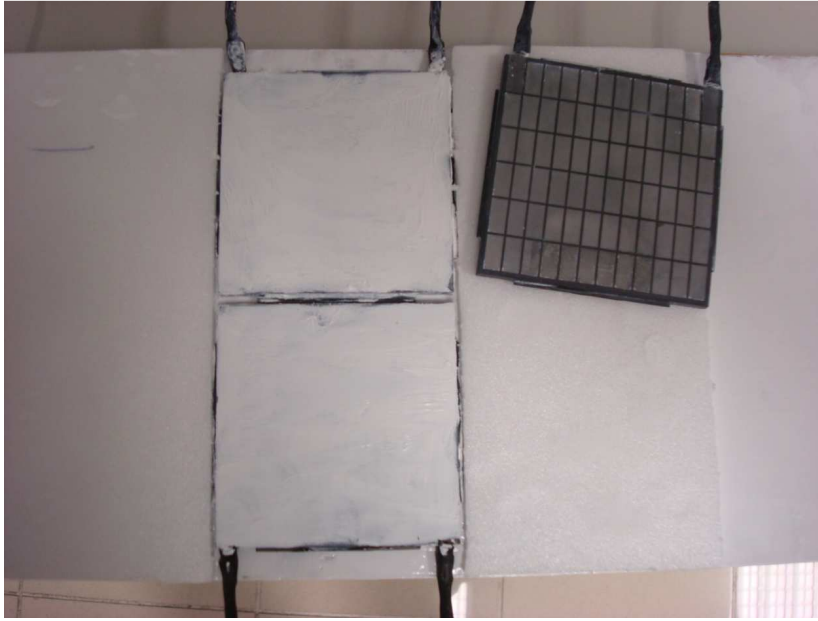
Pratik uygulamalarda genelde her şey ilk teorik düşünceyle örtüşmez. Şekil 3.11’de gözüktüğü üzere metal – metal temas yüzeyi istenildiği kadar düzgün olmayabilir. Sadece birbirine değen noktalarda katı ısı iletimi gerçekleşmektedir. Boşluklarda ise katıdan havaya ısı iletimi, ardından konveksiyon olmayacak kadar küçük bir kalınlıkta hava içerisinde gaz ısı iletimi ve son olarak da havadan katıya ısı iletimi gerçekleşmektedir. Dolayısıyla iki metal arasındaki ısı iletimi azalmakta, temas yüzeyi bir ısı direnç oluşturmaktadır. Bunun kısmi olarak önlenmesi için iki yüzeyin arasına, yüzey bozukluklarının yarattığı boşlukları dolduracak, ısı iletkenliği yüksek bir malzeme konulur. Deneyimizde, teorik plana ek olarak kullanacağımız ikinci malzeme ise Şekil 3.11’de görülen silikon ısı pastasıdır. Montaj esnasında bu pasta paslanmaz ısı değiştiricisi ile Kapton filmi arasına, Kapton filmi ile termoelektrik modül arasına, ve Kapton filmi ile alüminyum kanatçıklı yüzey arasında sürülecektir. Böylelikle ısının geçmesi istenilen bölgelerde, temas direnci azaltılmış olacaktır.

Deney kurulumuna, kanatçıklı yüzeyin ısı pastalanıp Kapton filminin serilmesiyle başlanmıştır. Ardından Kapton filmi üzerine, termoelektrik modüller için boşluk açılmış Depron köpükleri yerleştirilir. Şekil 3.12’de bu aşama görülmektedir.

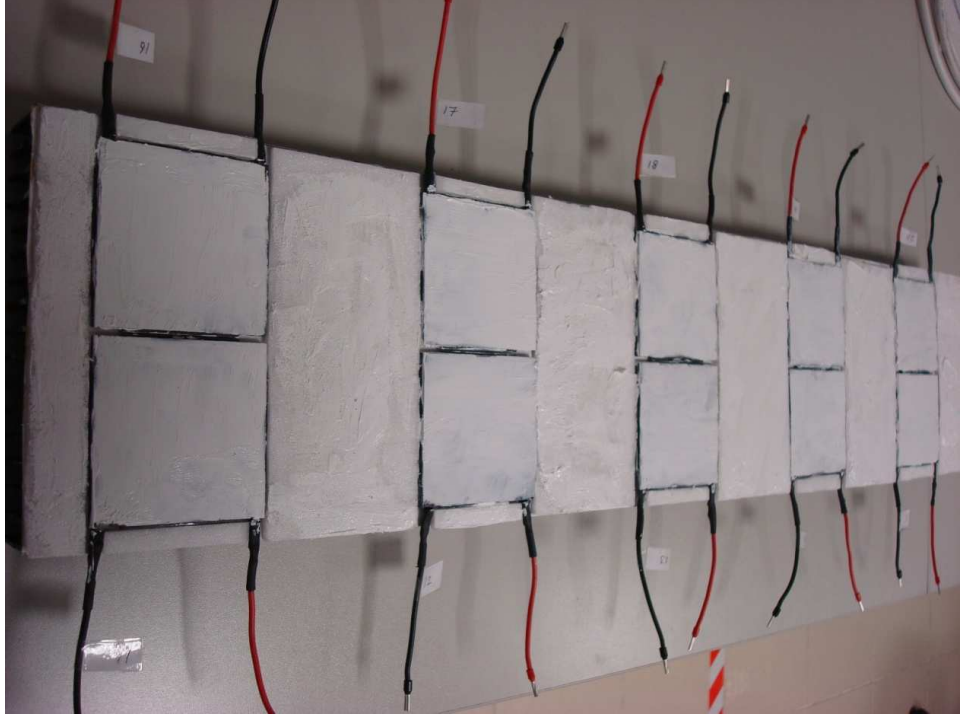


Şekil 3.12 : İzolasyonlu kanatçıklı yüzey.

Kapton üzerine termoelektrik modüllerin yerleştirileceği yerlere pasta sürülüp termoelektrik modüller yerleştirilir. Ardından termoelektrik modüller sıcak yüzleri kanatçıklı yüzeye gelecek şekilde yerlerine monte edilir. Şekil 3.13'te termoelektrik modüllerin ısı pastalanışı, Şekilde termoelektrik modüllerin dizilmiş ve pasta sürülmüş hali görülmektedir.

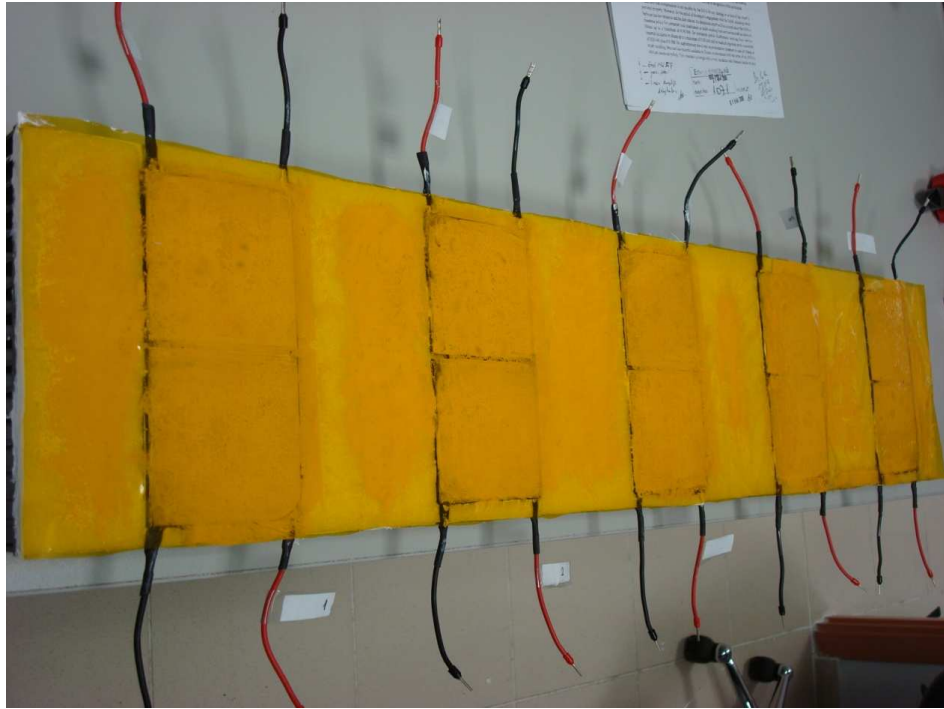


Şekil 3.13 : Termoelektrik modüllerin ısı pastalanışı.



Şekil 3.14 : TEG'lerin numaralandırılışı.

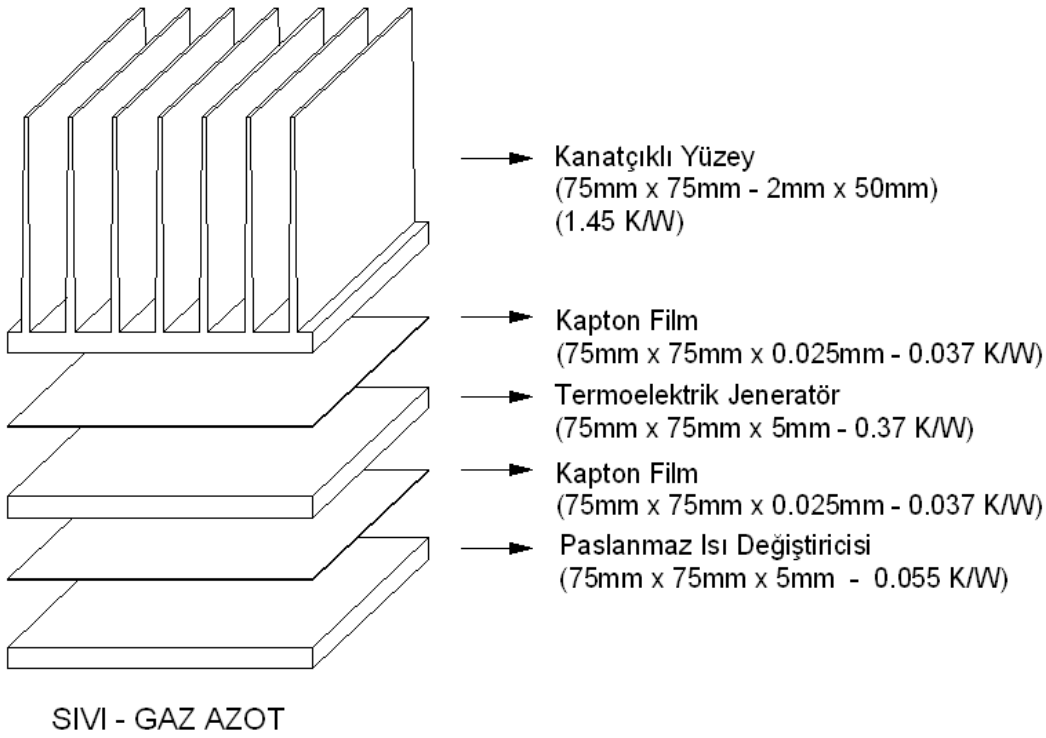
Dizilen termoelektrik modüller sırasıyla numaralandırılmıştır (Şekil 3.14). Pastalanmış termoelektriklerin üzerine ikinci Kapton katmanının yerleştirilmesiyle bir yüzün montaj öncesi dizilimi bitirilmiş olur. Şekil 3.15'te düzeneğin bu hali görülmektedir.



Şekil 3.15 : Bir yüzün montajı bitmiş görüntüsü.

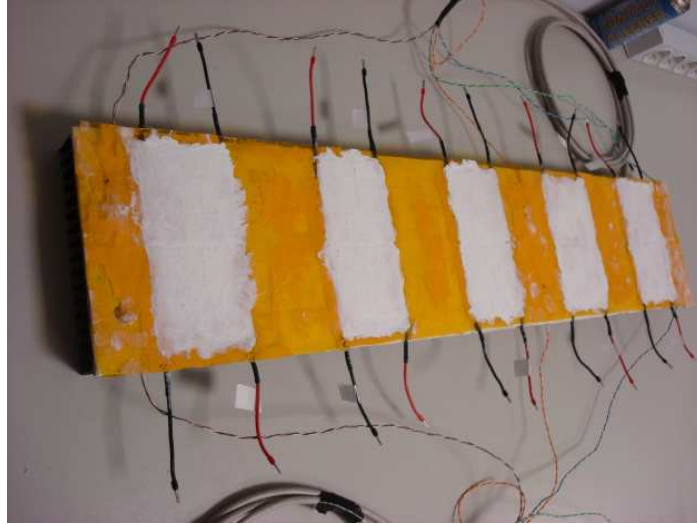
Oluşan sistemin bir termoelektrik boyutundaki katmanları Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Katmanlar, seri dizilmiş termal dirençler oluşturmaktadır. Katman termal dirençleri (R_t), δ katman et kalınlığı, k katman malzemesinin termal iletkenliği, A katman alanını simgelediği Denklem 3.1’de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Kanatçıklı yüzeyin termal direnci ise Frigus Primore firmasının Natsink programına hesaplatılmıştır.

$$R_t = \delta / kA \quad (3.1)$$



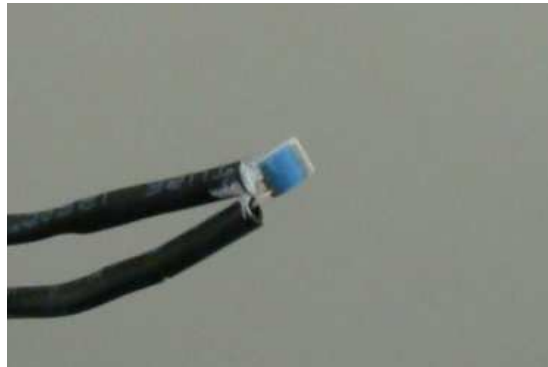
Şekil 3.16 : Deney düzeneğinin bir termoelektrik alanındaki katmanları.

Seri uygulamalarda toplam direnç, dirençlerin toplamı olduğu için sistemin toplam direnci 1.949 K/W olmaktadır. İçte 8 barda buharlaşmakta azot sıvısı bulunduğu için olduğu için sıcaklık 100 K olarak düşünülebilir. Ortamdaki hava sıcaklığının 300 K kabul edilirse, sıcaklık farkı 200 K, sistem direnci de 1.949 K/W olduğu için bir termoelektrik modül üzerinden geçen ısı 102.61 Watt olmaktadır. Dolayısıyla termoelektrik jeneratörün termal direnci 0.37 K/W olduğundan, modülün iki yüzü arasındaki sıcaklık farkı 40 K olur.



Şekil 3.17 : Sıcaklık sensörlü yüzün montaj görüntüsü.10

Düzeneğin diğer yüzünün dizilimi sırasında, deney verilerinin elde edilebilmesi için, istenilen noktalara sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). Sıcaklık sensörü olarak 16 adet PT 100 rezistans termometresi kullanılmıştır. Bu tür rezistans termometreler $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıkların ölçümünde kullanılabilirdiği gibi termokupplardan da çok daha güvenilirlerdir. Sıcaklık ölçümü, sıcaklıkla değişimi bilinen Platin elementinin rezistansının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. En yaygın kullanılan rezistans termometre olan PT 100 elemanın, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki direnci 100 Ohm , $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki direnci ise 138.4 Ohm 'dur. Şekil 3.18'de deneyde kullanılan PT 100 elemanlarından biri görülmektedir.



Şekil 3.18 : PT 100 elemanı

PT 100 elemanı üzerinden okunan direnç değerinin sıcaklık fonksiyonu ile sıcaklığa dönüşümü yapılmalıdır. PT 100 elemanın sıcaklığa bağlı direnç fonksiyonu Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : PT 100 elemanın sıcaklığa bağlı direnç fonksiyonu.

PT100 DIN EN 60751 Sıcaklığa Bağlı Direnç Fonksiyon Çizelgesi	
$\alpha = 0.00385 / ITS - 90$	
$t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} :$ $R(t) = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$ $A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ $R_0 = 100 \text{ } \Omega$	$t < 0 \text{ } ^\circ\text{C} :$ $R(t) = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ\text{C}) \cdot t^3]$ $A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ $C = -4.183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ $R_0 = 100 \text{ } \Omega$
$dt = \pm (0.3 + 0.005 \cdot t) \text{ } ^\circ\text{C}$	

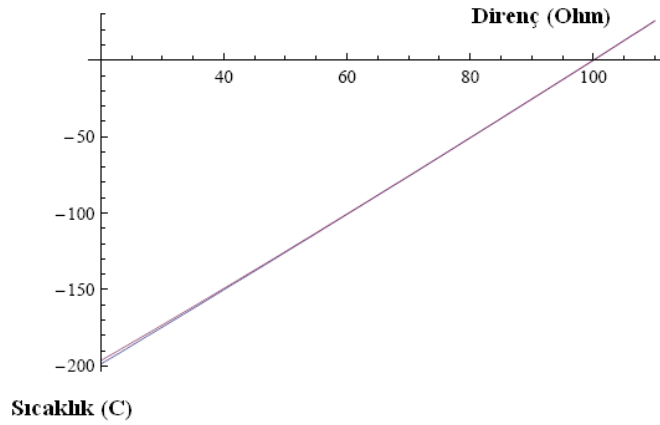
Sıcaklık ölçülürken rezistans termometreden direnç değeri okunacağı için Çizelge 3.5'teki sıcaklığa bağlı direnç fonksiyonunun, dirence bağlı sıcaklık fonksiyonuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Kriyojenik sıcaklıklarda çalışılacağı için $t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ fonksiyonunun dönüştürülmesi yeterli olacaktır. Matematica programı kullanılarak Şekil 3.19'daki çözüm elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \ln[28] := & \\
 & 25. \cdot + 0.5 \cdot \sqrt{\left(-89539.20631125987 \cdot + (5.039684199579498 \cdot (-109.1063419794406 \cdot + 1. \cdot rs) \right) /} \\
 & \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 rs + \right. \\
 & \left. 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \\
 & \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} + \\
 & 6.324810948952897 \cdot \cdot 8 \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 rs + \right. \\
 & \left. 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \\
 & \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} - \\
 & 0.5 \cdot \sqrt{\left(-179078.4126225197 \cdot - (5.039684199579498 \cdot (-109.1063419794406 \cdot + 1. \cdot rs) \right) /} \\
 & \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 rs + \right. \\
 & \left. 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \\
 & \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} - \\
 & 6.324810948952897 \cdot \cdot 8 \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 rs + \right. \\
 & \left. 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \\
 & \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} + \\
 & 1.8551029763327758 \cdot \cdot 9 / \left(\sqrt{\left(-89539.20631125987 \cdot + \right. \right. \\
 & \left. \left. (5.039684199579498 \cdot (-109.1063419794406 \cdot + 1. \cdot rs) \right) / \right.} \\
 & \left. \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 rs + \right. \right. \\
 & \left. \left. 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \right. \\
 & \left. \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} + \right. \\
 & \left. 6.324810948952897 \cdot \cdot 8 \left(1.886245117810965 \cdot \cdot - 9 - 1.6920481796999999 \cdot \cdot - 12 \right. \right. \\
 & \left. \left. rs + 7.112686410338529 \cdot \cdot - 13 \sqrt{268.5394863437884 \cdot - 1. \cdot rs} \right. \right. \\
 & \left. \left. \sqrt{31025.73093824082 \cdot - 64.43877978738055 \cdot rs + rs^2} \right)^{1/3} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Şekil 3.19 : Matematica programında fonksiyon uzun çözümü.

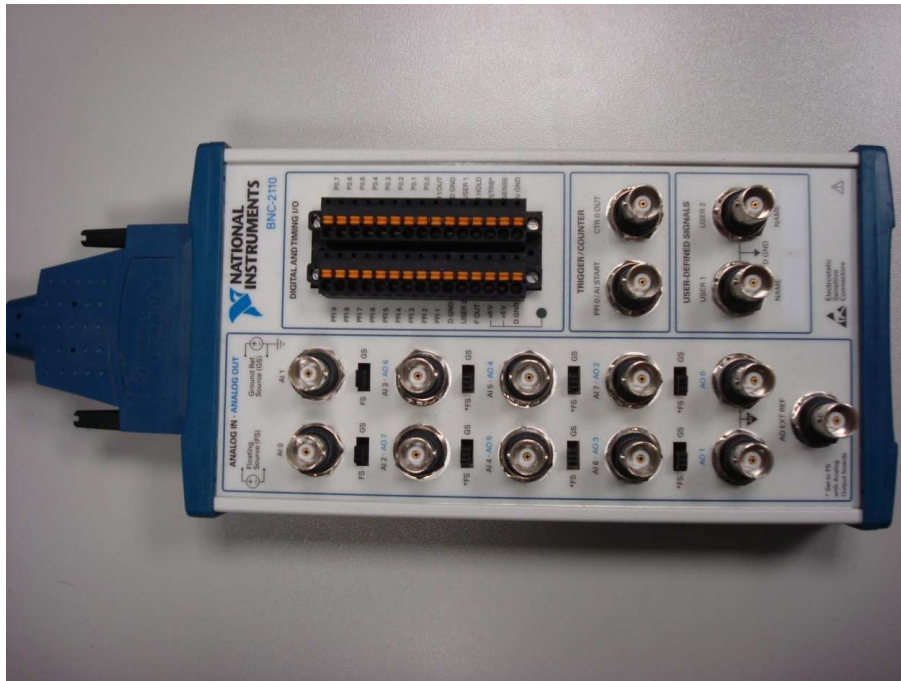
Bu uzun fonksiyonun Labview programında oluşturulması zor olacağından Çizelge 3.5'teki fonksiyonun sonundaki “(C.(T-100°C).T³)” ifadesi çıkartılarak fonksiyon çözdürülmüş ve anlamlı kök ifadesi denklem (3.1)'deki şekilde elde edilmiş, tam çözüm ve kısaltılmış çözümün Şekil 3.20'de görülen T-R grafikleri çizdirilmiş, kısaltılmış çözümün küçük bir sapma ile tam çözümle örtüştüğü görülmüştür.

$$T(r) = 8658.01(0.39083 - 0.0151987\sqrt{761.247 - r}) \quad (3.1)$$

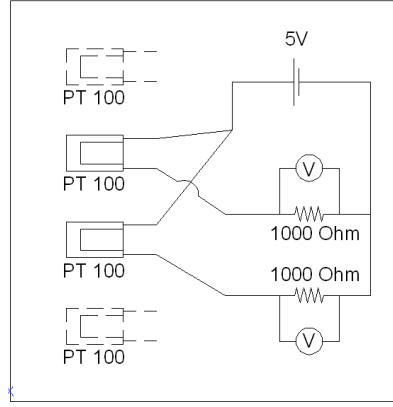


Şekil 3.20 : Tam çözümle kısaltılmış çözümün T-R grafiği

Deneyde veri toplama için National Instruments firmasının BNC – 2210 bağlama bloğu kullanılacaktır. Blok Şekil 3.21'de görülmektedir.

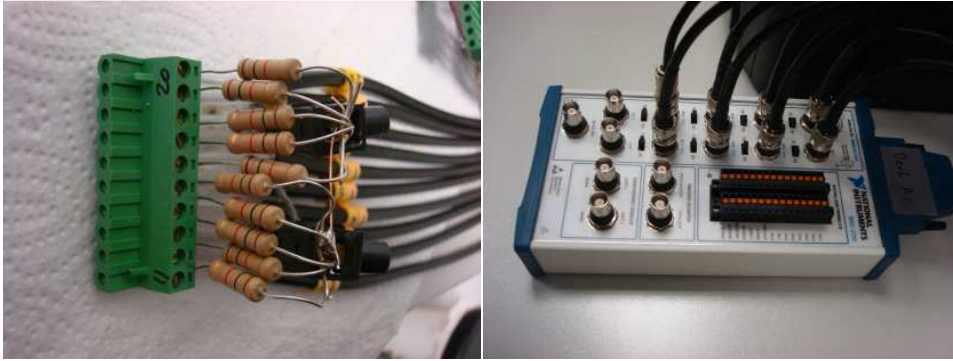


Şekil 3.21 : National Instruments BNC-2210 veri toplama bloğu.



Şekil 3.22 : PT 100 direncinin okunabilmesi için oluşturulan devre şeması.

BNC – 2210 bloğu sadece voltaj datası okuyabilmektedir. Akım ve Direnç değeri veri olarak alınamamaktadır. Dolayısıyla rezistans termometrelerin direnç değerleri Şekil 3.22’de görülen devre oluşturularak ölçülecektir. Öncelikle PT 100 veri kablolarının bir ucu ve NI bloğundan alınan 5V besleme kablosu sarmal haline getirilip lehimlenmiştir. PT 100 veri kablolarının diğer uçlarına ise seri olarak 1 kΩ’luk dirençler bağlanmış, direnç sonrasında kablolar tekrar birleştirilip NI bloğu üzerindeki toprak hattına bağlanmıştır. Şekil 3.23’te görülen dirençlerin bağlandığı klemensin diğer ucuna da PT 100 veri kabloları bağlanmıştır.

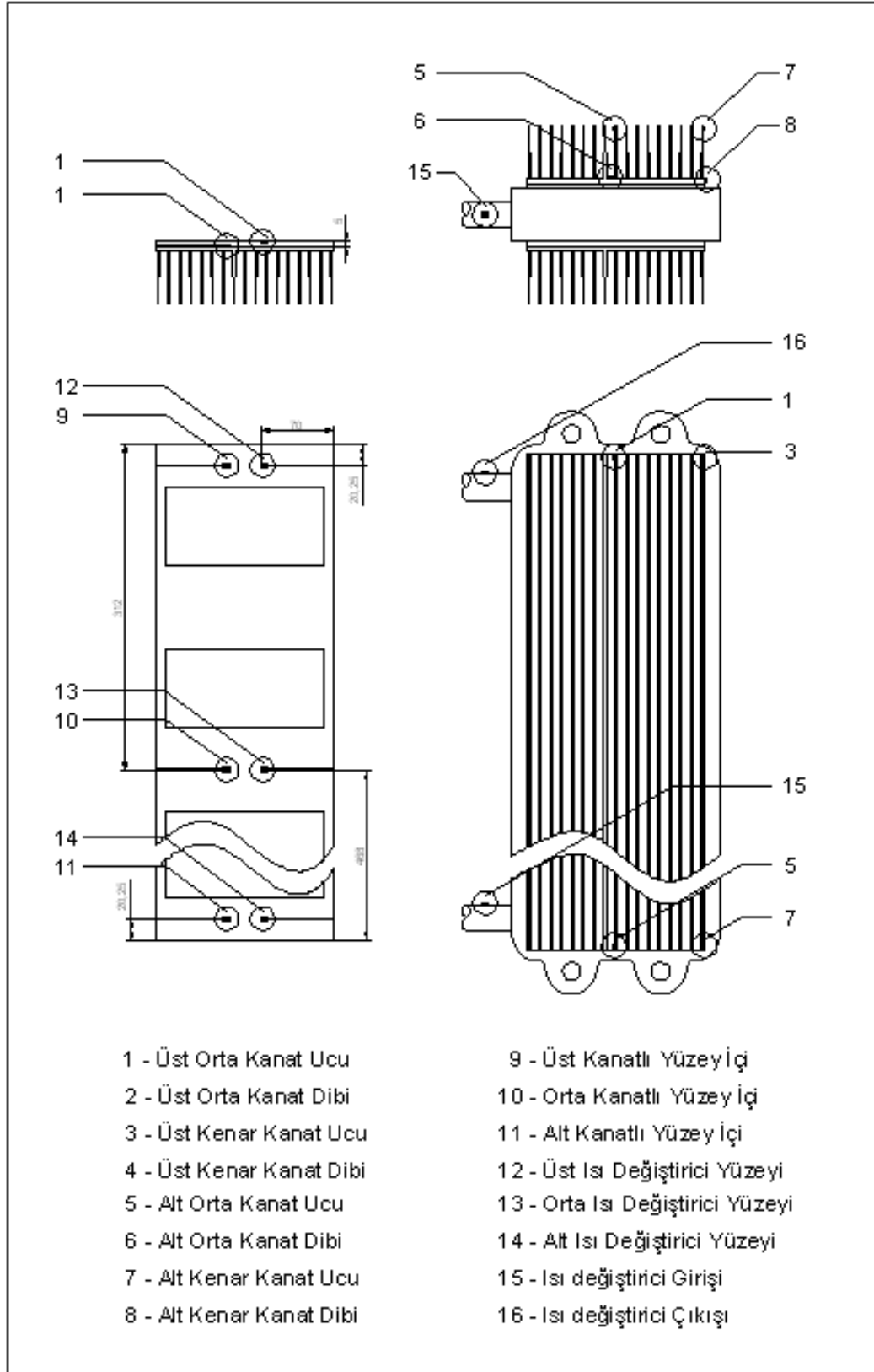


Şekil 3.23 : Direnç bağlantıları ve koaksiyel kabloların veri bloğuna girişi.

Böylelikle 5V gerilim, kendi aralarında paralel olan 16 adet seri bağlı PT 100 ve 1 kΩ direnç üzerine uygulanmış olmaktadır. Ardından 1 kΩ dirençler üzerindeki gerilim düşümleri koaksiyel kablolarla NI bloğuna aktarılmıştır. Gerilim düşümleri V, rezistans termometredeki direnç değeri de R olarak simgelenirse, dirençler Denklem 3.2’deki şekilde bulunabilir.

$$R = \frac{1000 \cdot (5 - V)}{V} \quad (3.2)$$

PT 100 elemanlarının deney düzeneği üzerinde yerleştirildiği noktalar ve numaralandırılması Şekil 3.24'te gösterilmiştir.

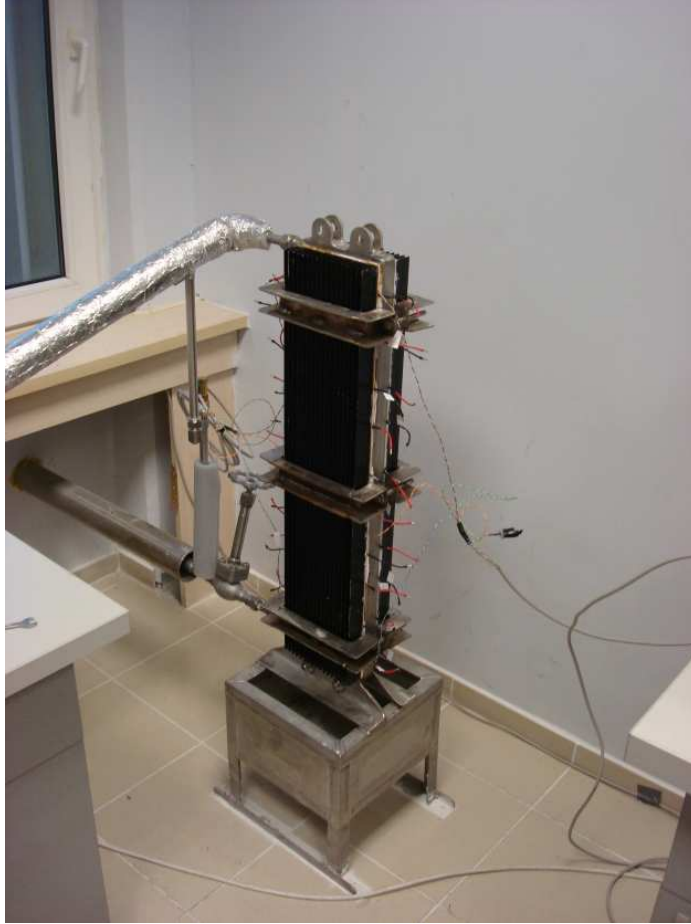


Şekil 3.24 : PT 100 yerleştirilme noktaları.



Şekil 3.25 : Isı değiştiricisinin ısı pastalanışı.

Paslanmaz ısı değiştirici yzeyinde termoelektrik modüllerin geleceği bölümler Şekil 3.25'te görüldüğü gibi pastalandıktan sonra iki yüz birleştirilip, taşıma kulaklarıyla sıkılır. Ardından deney düzeneği yerine oturtulup civatalanarak son halini alır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 : Montaj edilmiş deney düzeneği.



Şekil 3.27 : Alicat Scientific gaz debi ölçer.

Sıvı azot sisteme verildiğinde, azot ısı değiştiricisinde kısmi olarak buharlaştırılacak, buharlaşmayan kısım ise nihai azot evaporatöründe buharlaştırılacaktır. Evaporatör sonrasına konulmuş, Alicat Scientific gaz debi ölçer sayesinde sistemden geçen azotun debisi ve basıncı görülebilmektedir (Şekil 3.27). 1.5 m³/h gaz debisi ölçüm kapasitesi ve 8 bar maksimum çalışma basıncıyla deney için yeterli bir ünedir.

Termoelektrik jeneratörlerde üretilen gücün, Elektro-Atomatik firmasının 9080-200 model elektronik yük ile karakterizasyonu yapılacaktır (Şekil 3.28). Cihazın maksimum giriş gerilimi 80 V, giriş akımı 200 A, doğrusal özgül gücü 1.2 kW'dır.



Şekil 3.28 : Elektro-Atomatik firmasının 9080-200 elektronik yükü.

Ön denemeler sonucu havadan doğal taşınım ile ısı soğrulmasında kanatçıklı yüzeyin ısı transfer yüzey alanının yetersiz kaldığı görülmüş ve ısı transferini iyileştirmek için Şekil 3.29’da görülen 25 Watt gücünde, 300 m³/h debili bir fan ile zorlanmış taşınım denemesi yapılmıştır.



Şekil 3.29 : Fan ilaveli deney düzeneği.

4. HZ-20 TERMoeLEKTRİK JENERATÖR MODÜLÜNÜN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

4.1 Deney Düzeneginin Tasarımı

Termoelektrik modülün karakterizasyon deneyleri, soğuk yüzeyin devar kabına konulan sıvı azot, sıcak yüzeyin ise 250 watt'lık 4 adet paslanmaz fişek içeren bakır ısıtıcı ile sağlandığı düzenek ile gerçekleştirilecektir.



Şekil 4.1 : Variak trafo ve devar kabı.

Şekil 4.1'de sağda deneyde kullanılan devar kabı görülmektedir. 26 kg sıvı azot taşıma kapasitesi olan kap, vakumlu cidarı sayesinde birim zamanda çok az bir ısı kaybı ile sıvı azotu uzun süre koruyabilmektedir.

Isıtıcı olarak, içerisine açılan dairesel kanallara, 220V beslendiğinde 250Watt ısı üreten 4 adet paslanmaz fişek yerleştirilmiş, 8cm x 8cm x 1.5 cm bakır plaka kullanılmıştır (Şekil 4.2). Isıtıcının gerilimi, Şekil 4.1'de solda görünen, 3.5 kW gücündeki variak trafo ile kontrol edilerek sistemin istenilen sıcaklık farkları arasında çalışması sağlanmıştır.



Şekil 4.2 : Bakır ısıtıcı ve paslanmaz fişekler.

Soğuk rezervuar oluşturmak için ısı iletim katsayısı yüksek bakırdan yaptırılan bir blok kullanılmıştır (Şekil 4.3). Devar kabının boğaz çapı ve yüksekliği göz önüne alınarak 6 cm çapında 53 cm boyunda içi dolu bakır bir bloğa 12x16x1 cm boyutlarında bir bakır plaka gümüş kaynağı ile kaynak yapılarak masif bir yapı oluşturulmuştur. Bakır plakanın ortası oyularak yapılan bu kaynakla maksimum düzeyde termal kontak sağlanmıştır. Deneyler esnasında devar kabının iç basıncının dengede tutulması ve buharlaşan havanın rahatça tahliye olması için bakır bloğun altına 1.8cm kalınlığında strafor yalıtım malzemesi yerleştirilip hava kanalı açılmıştır.



Şekil 4.3 : Bakır Blok.

Deney verilerinin doğru alınabilmesi için termoelektrik jeneratörün altına ve üstüne yerleştirilecek bakır plakaların modüle denk gelecek yüzeylerine freze ile, termokuplların girebileceği kadar kanal açılmıştır. Böylelikle termokuplların modül ile bakır yüzey arasında boşluk yaratması önlenmiştir. Şekil 4.4'te bakır plakalar görülmektedir.



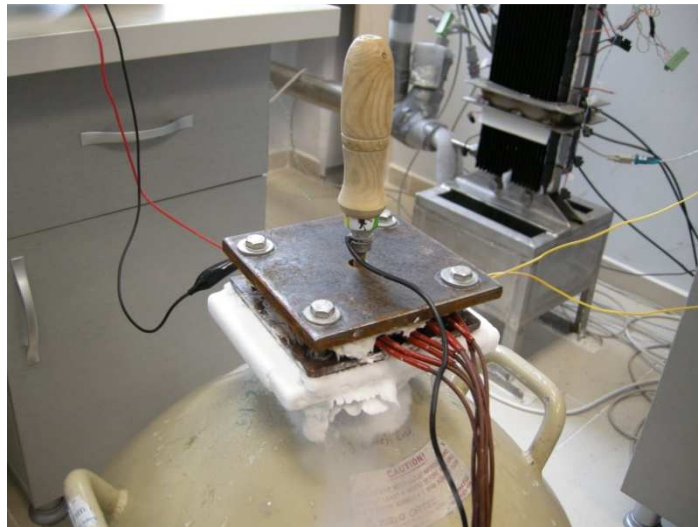
Şekil 4.4 : Modül altı ve üstü bakır plakalar.

Sıcaklık ölçümü, daha önceden veri kartı ile ölçülen sıcaklıklarda çıkan sorunlar nedeniyle, kalibrasyonundan emin olunan Lutron marka bir termometre ile yapılmıştır. Kullanılan termometre Şekil 4.5'te görülmektedir. Veriler her saniye RS232 portu ile bilgisayara taşınıp kaydedilmektedir.

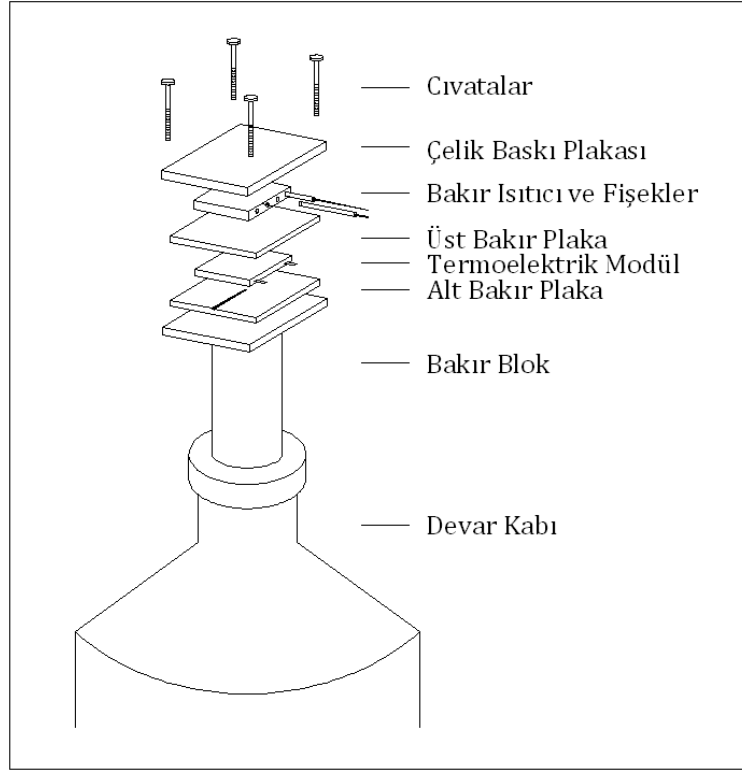


Şekil 4.5 : Lutron marka termometre.

Bakır plakaların yüzeylerine açılan kanallara termokupllar yerleştirildikten sonra, ısı iletiminin iyi olması için, kanal içerisine ısı pastası doldurulmuştur. Plaka yüzeyine de ısı pastası sürüldükten sonra elektriksel yalıtımın sağlanması için Kapton filmi yerleştirilmiştir. Kapton filminin üzerine de ısı pastası sürüldükten sonra modül yerleştirilmiş, modülün diğer yüzüne ısı pastası – Kapton – ısı pastası – termokupl – bakır plaka konularak sandviç sistem tamamlanmıştır. Sandviç sistemin üzerine ısıtıcı, ısıtıcı üzerine de düzeneğin modül üzerine dengeli basınç uygulaması için çelik bir plaka yerleştirilmiş, çelik plaka ile soğuk rezervuar olarak kullanılan bakır blok 4 adet 8mm’lik cıvata ile birbirine monte edilmiştir. Böylelikle termoelektrik modül üzerinde basınç yaratılarak ısı transferinin iyileşmesi sağlanmıştır. Şekil 4.6’da düzeneğin resmi ve Şekil 4.7’de ise düzeneğin şeması şekilde yer almaktadır.



Şekil 4.6 : Deney düzeneği.



Şekil 4.7 : Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Termoelektrik jeneratörde üretilen gücün, Elektro-Atomatik firmasının 9080-200 model elektronik yük ile karakterizasyonu yapılmıştır (Şekil 4.8). Cihazın maksimum giriş gerilimi 80 V, giriş akımı 200 A, doğrusal özgül gücü 1.2 kW'dır. Cihazdan alınan voltaj akım ve güç verileri, veri kartı ile Labview programına taşınıp saniyede bir olarak kaydedilmiştir. Ölçülen voltaj verilerinin kontrolü, sisteme paralel bağlı, Şekil 4.8'de görülen Fluke marka avometre ile yapılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Elektro-Atomatik marka dijital yük ve Fluke marka avometre.

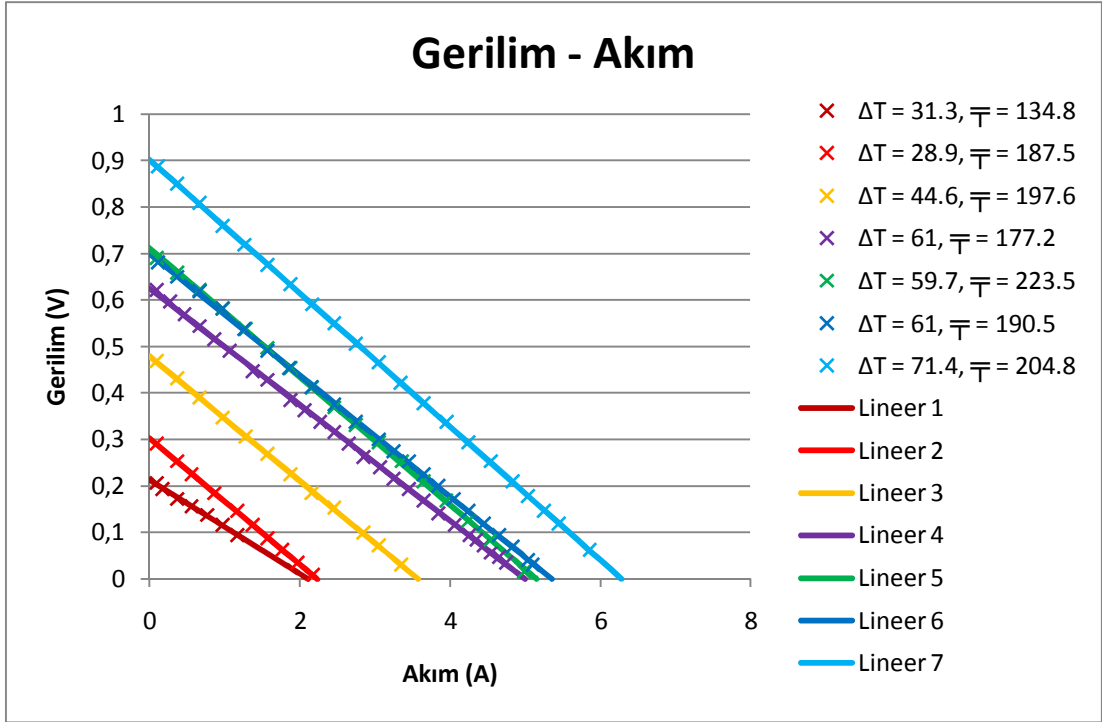
4.2 HZ-20 Modül Deneyinin Voltaj – Akım Grafikleri

Kurulan deney düzeneği ile farklı sıcaklık farkı ve ortalama sıcaklıklarda, dijital yük üzerinde yük direncinin artırılmasıyla voltaj akım grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen verileri, Denklem 2.35 yardımıyla öngörülen lineer doğru Matlab programı ile uydurulmuştur.

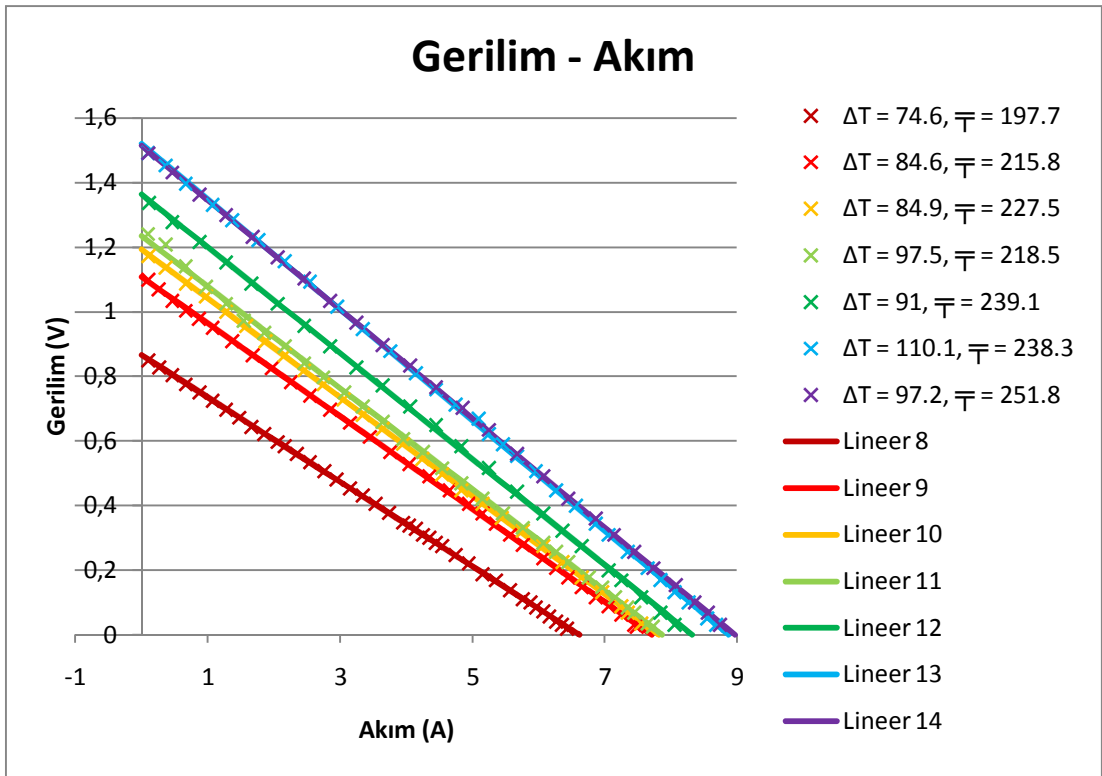
Şekil 4.9'dan Şekil 4.21'e kadar olan grafiklerde Çizelge 4.1'de verilen veriler sırasıyla kullanılacaktır.

Çizelge 4.1 : Farklı Deney Durumları için Grafik verileri.

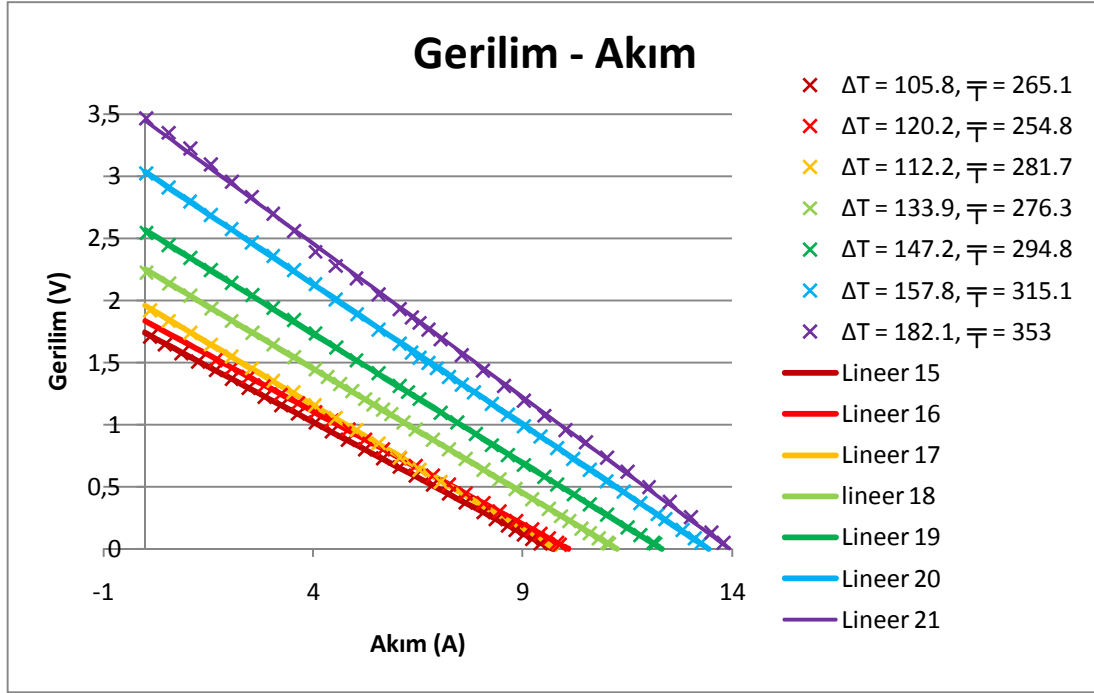
	T1	T2	ΔT	\bar{T}
Durum 1	150.5	119.2	31.3	134.85
Durum 2	201.9	173	28.9	187.45
Durum 3	219.9	175.3	44.6	197.6
Durum 4	207.7	146.7	61	177.2
Durum 5	253.4	193.7	59.7	223.55
Durum 6	221	160	61	190.5
Durum 7	240.5	169.1	71.4	204.8
Durum 8	235	160.4	74.6	197.7
Durum 9	258.1	173.5	84.6	215.8
Durum 10	270	185.1	84.9	227.55
Durum 11	267.2	169.7	97.5	218.45
Durum 12	284.6	193.6	91	239.1
Durum 13	293.4	183.2	110.1	238.3
Durum 14	300.4	203.2	97.2	251.8
Durum 15	318	212.2	105.8	265.1
Durum 16	314.9	194.7	120.2	254.8
Durum 17	337.8	225.6	112.2	281.7
Durum 18	343.3	209.3	133.9	276.3
Durum 19	368.4	221.2	147.2	294.8
Durum 20	394	236.2	157.8	315.1
Durum 21	444.1	261.9	182.1	353



Şekil 4.9 : 1. Gerilim – Akım grafiği.



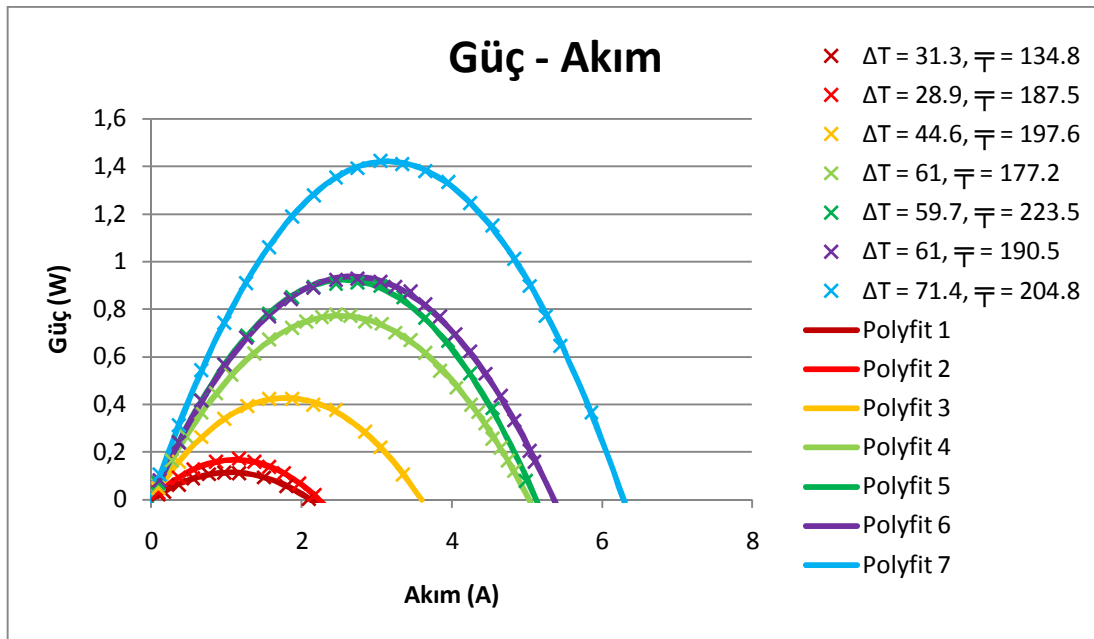
Şekil 4.10 : 2. Gerilim – Akım grafiği



Şekil 4.11 : 3. Gerilim – Akım grafiği.

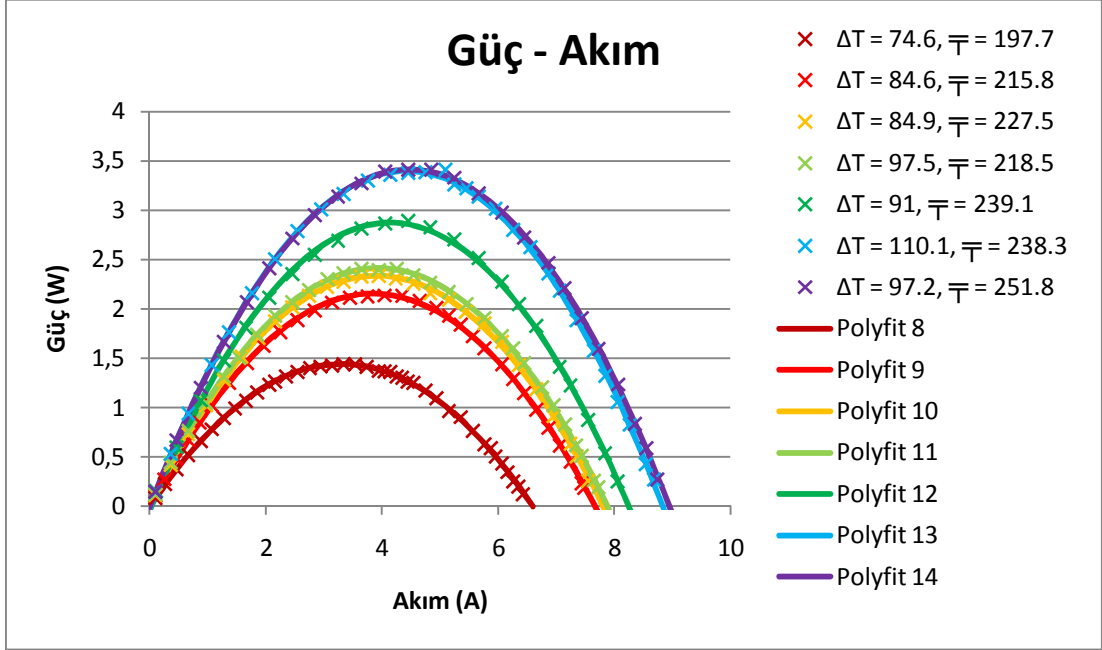
Grafiklerde görüldüğü üzere sıcaklık farkının artışıyla beraber açık devre gerilimi ve kısa devre akımının da artış göstermektedir. Bu gerilim ve akım değerleriyle; güç – akım, voltaj – yük direnci ve güç yük direnci grafikleri rahatlıkla çizdirilebilecektir.

4.3 HZ-20 Modül Deneyinin Güç – Akım Grafikleri

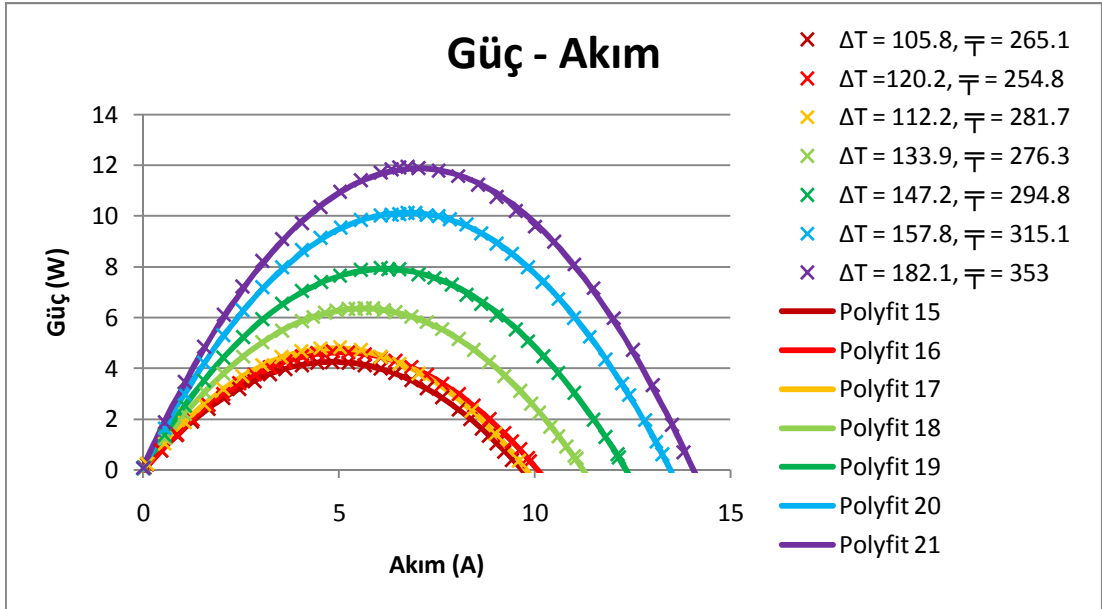


Şekil 4.12 : 1. Güç – Akım grafiği.

Güç – Akım grafiklerine Matlab programında eğri uydurulurken Denklem 2.47 göz önünde bulundurulmuş ve ikinci dereceden polinom çizdirilmiştir. Grafiklerde akım ile birlikte bir noktaya kadar gücün arttığı, bir noktadan sonra düşmeye başlayıp sıfırlanana kadar gittiği görülmektedir. Bunun nedeni voltaj akım grafiğinde görülmektedir. Ayrıca sıcaklık farkı artışlarıyla gücün de arttığını görülmektedir.



Şekil 4.13 : 2. Güç – Akım grafiği.

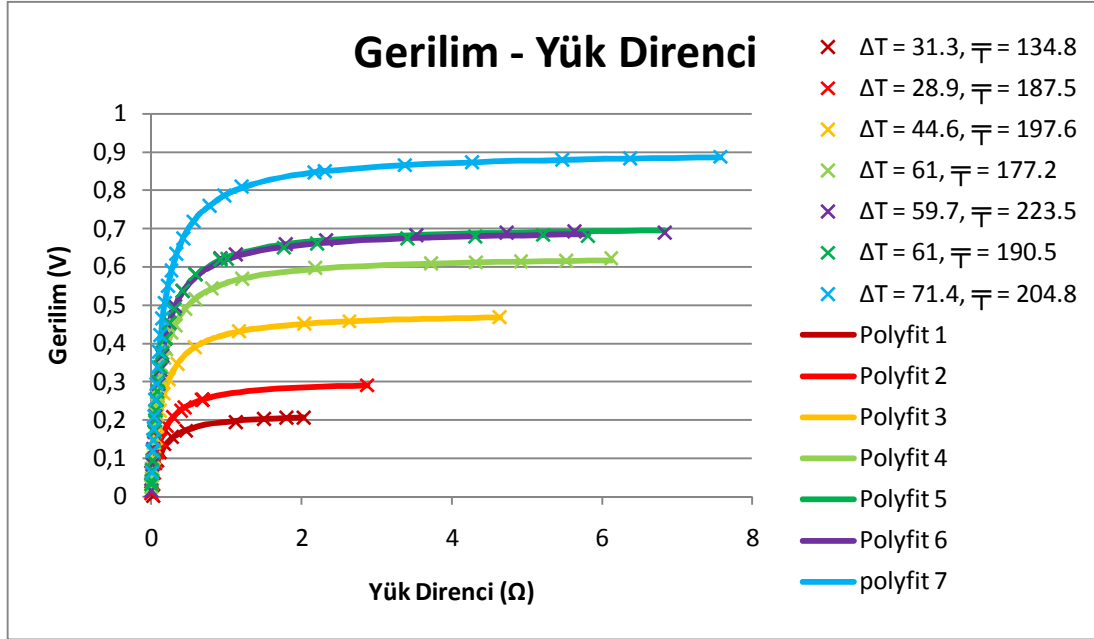


Şekil 4.14 : 3. Güç – Akım grafiği.

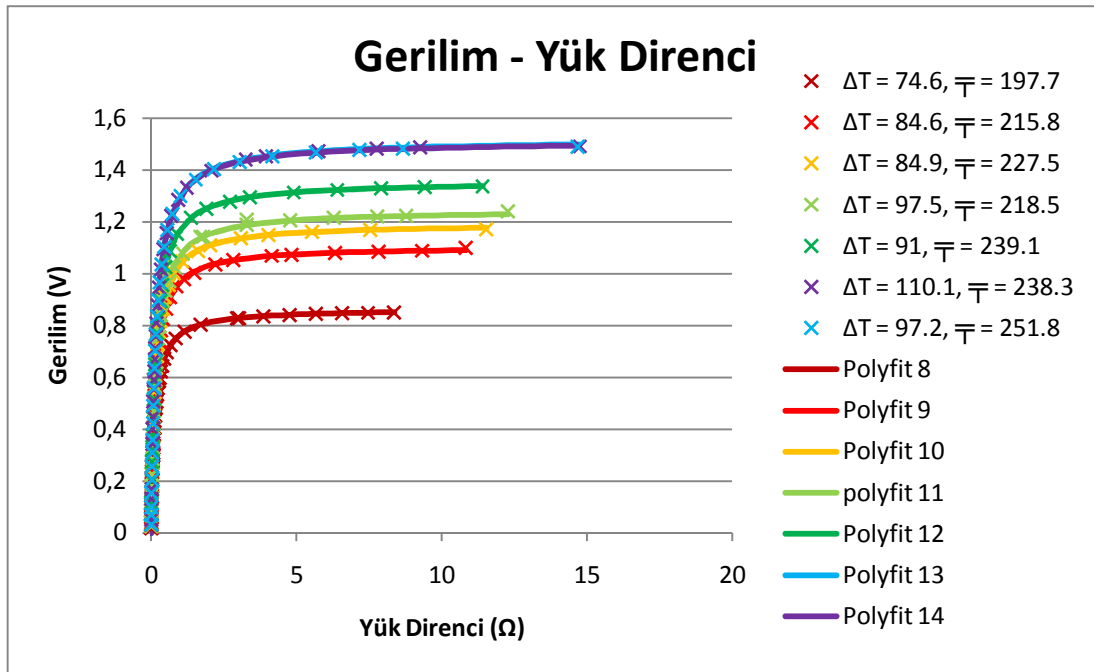
4.4 HZ-20 Modül Deneyinin Gerilim – Yük Direnci Grafikleri

Deneylerde elde edilen voltaj – yük direnci dataları, denklem 4.1 yardımıyla eğri uydurularak çizdirilen grafikleri Şekil 4.15 – 4.16 – 4.17’de verilmiştir.

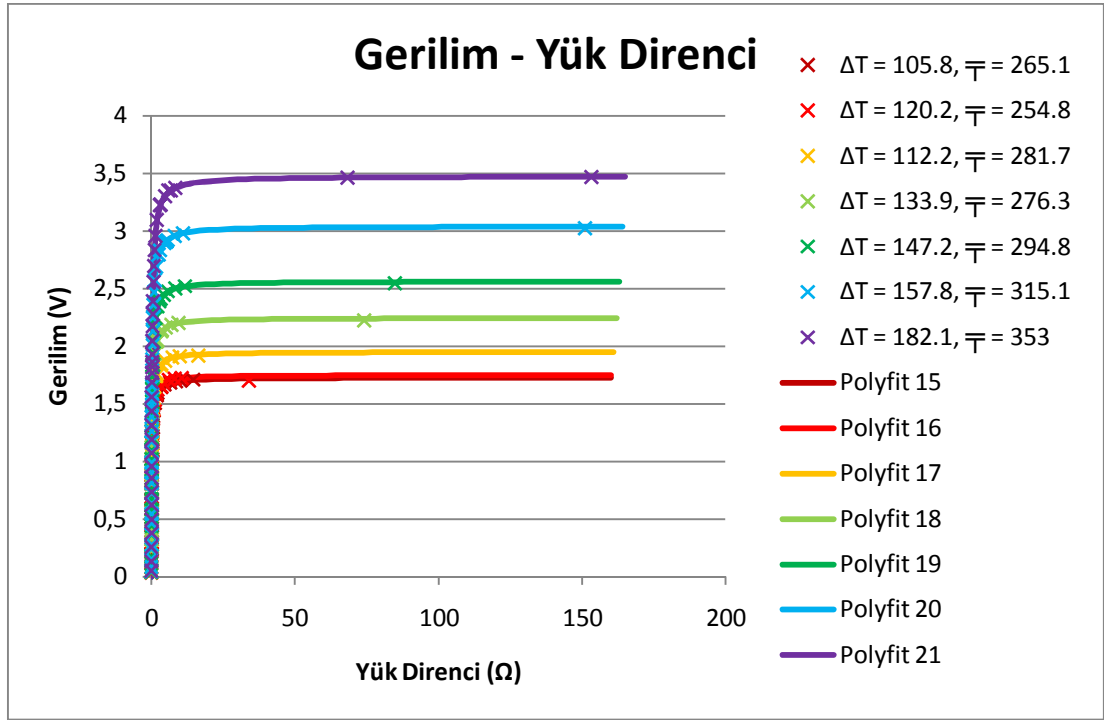
$$V = V_0 - IR_i = V_0 - \frac{V_0}{(R_0 + R_i)} R_i = \frac{ax+b}{x+c} \quad (4.1)$$



Şekil 4.15 : 1. Gerilim – Yük Direnci grafiği.



Şekil 4.16 : 2. Gerilim – Yük Direnci grafiği.



Şekil 4.17 : 3. Gerilim – Yük Direnci grafiği.

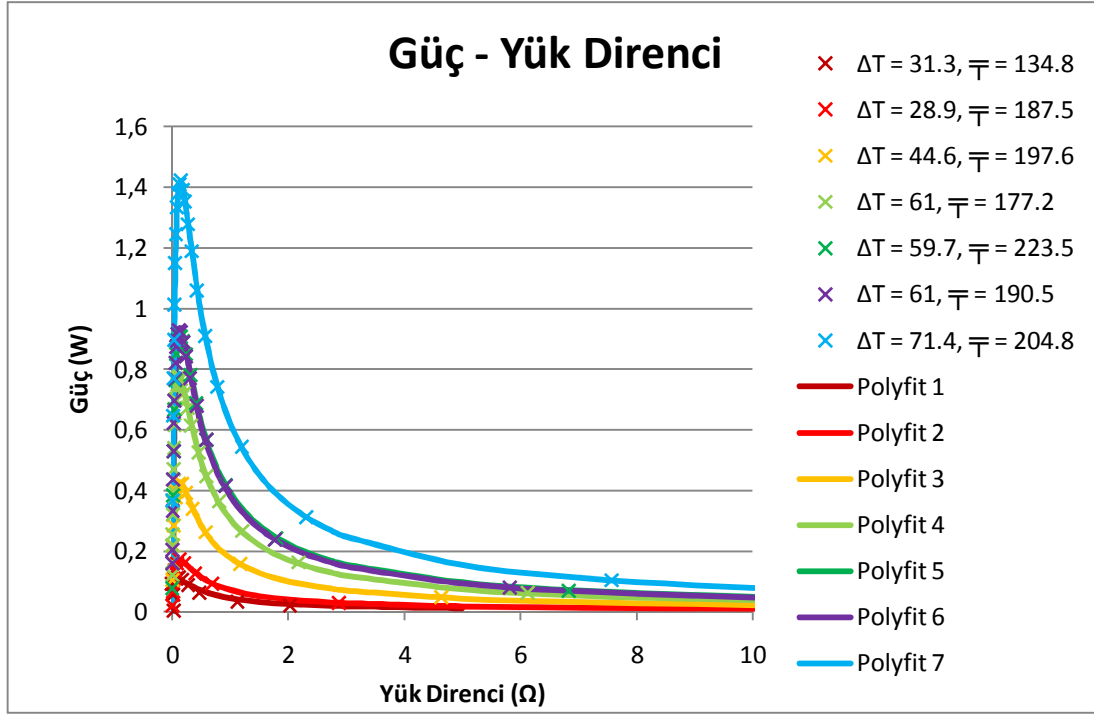
Grafiklerde görüldüğü üzere sıcaklık farkının artmasıyla gerilim artmakta ve yük direncinin değişimine göre gerilim, akım büyüklükleri ayarlanabilmektedir. Sıcaklık farkının fazla olduğu ve dolayısıyla gerilim yüksek olduğu çalışma sıcaklıkları için gerilim değerleri daha geç doyuma ulaşmaktadır.

4.5 HZ-20 Modül Deneyinin Güç – Yük Direnci Grafikleri

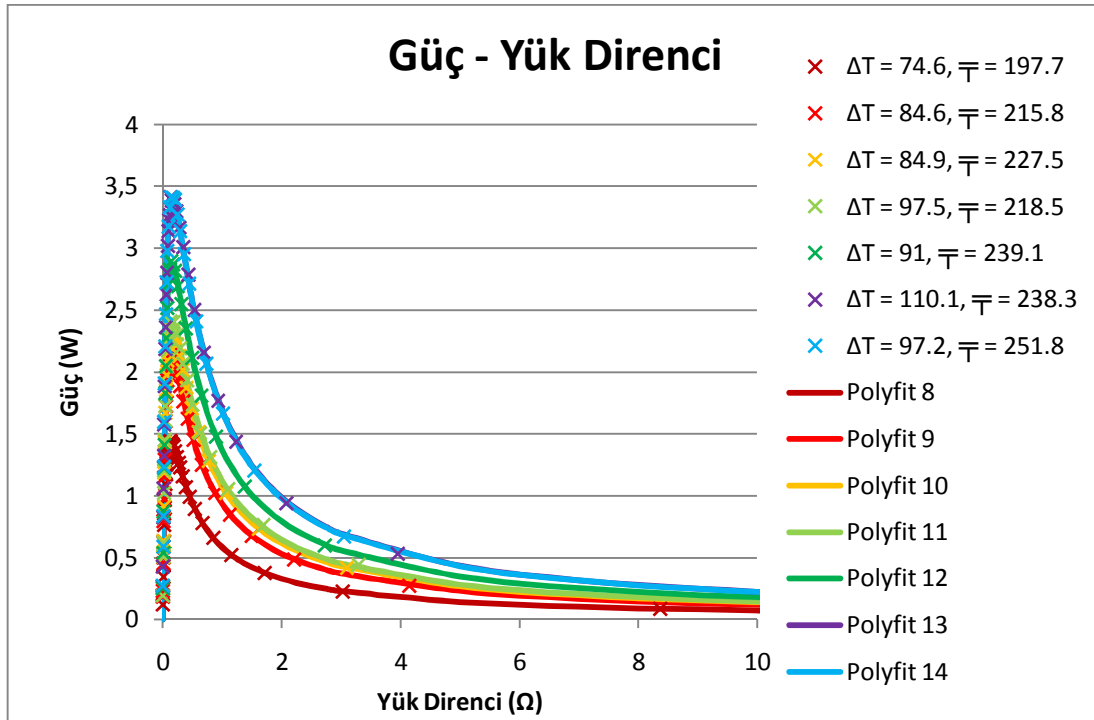
Deneylerde elde edilen güç – yük direnci verileri, denklem 4.2a ve 4.2b yardımıyla eğri uydurularak çizdirilen grafikleri Şekil 4.18 – 4.19 – 4.20’de verilmiştir.

$$P = I \cdot (V_0 - IR_i) = \left[V_0 - \frac{V_0}{(R_0 + R_i)} R_i \right] \cdot \frac{V_0}{(R_0 + R_i)} = \frac{V_0^2 \cdot R_0}{(R_0 + R_i)^2} \quad (4.2a)$$

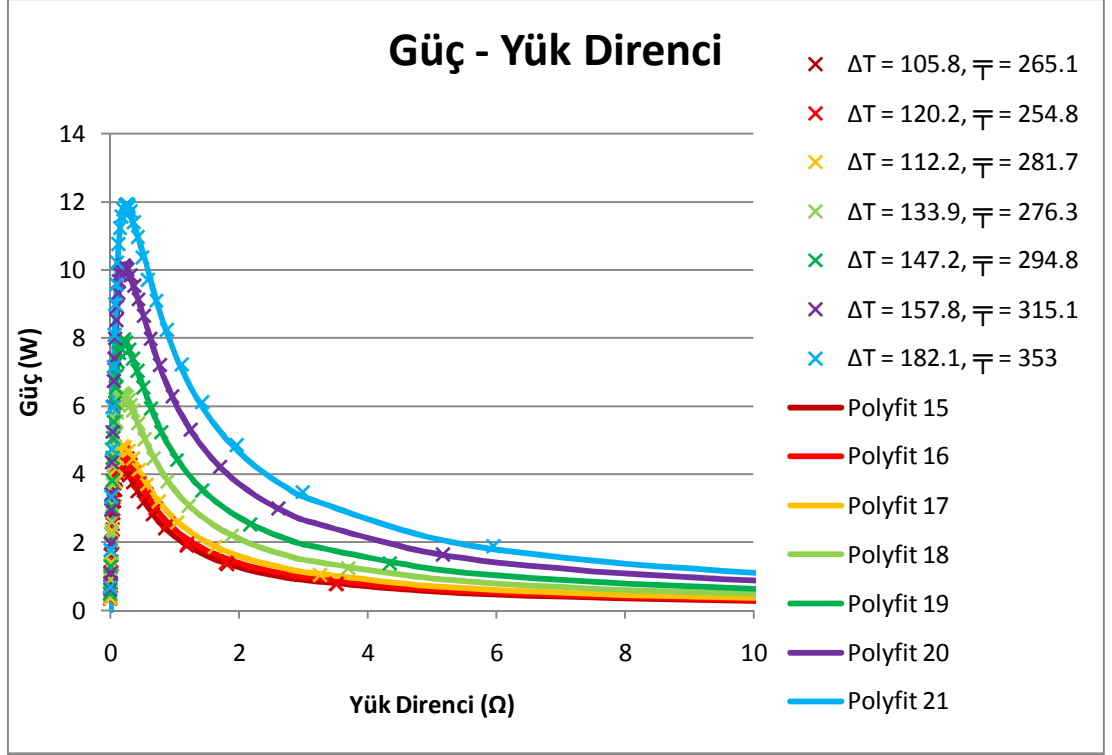
$$P = \frac{ax}{(b+x)^2} \quad (4.2b)$$



Şekil 4.18 : 1. Güç – Yük Direnci grafiği.



Şekil 4.19 : 2. Güç – Yük Direnci grafiği.



Şekil 4.20 : 3. Güç – Yük Direnci grafiği.

Dijital yükün yük direncini değiştirerek HZ 20 termoelektrik modülün üretebileceği maksimum ile minimum güç arasındaki değişimi bu grafiklerden görülebilmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi güç, küçük yük direnci değerlerinde maksimum değerini almakta ve yük direncinin artması ile azalma eğilimine girmektedir. Çok düşük direnç değerlerinde maksimum güç değerine çıkılmasının nedeni denklem 2.47’de açıklanmaktadır. Maksimum güç değerine iç direncin yük direncine eşit olduğu durumda ulaşıldığından ve termoelektrik modülün iç direncinin birkaç ohm gibi küçük değerler aldığından dolayı gücün maksimum değerinin gözlemlendiği yük direnci de küçük olmaktadır. Sıcaklık arttıkça maksimum güç değerine ulaşıldığı yük direncinin de artması, iç direncin sıcaklıkla arttığını göstermektedir.

4.6 HZ-20 Modül Deneyinin İç Direnç – Ortalama Sıcaklık Grafiği

Farklı deney durumları için açık devre gerilim, kısa devre akımı, maksimum güç verileri, iç direnç ve Seebeck katsayısı Çizelge 4.2’de verilmiştir.

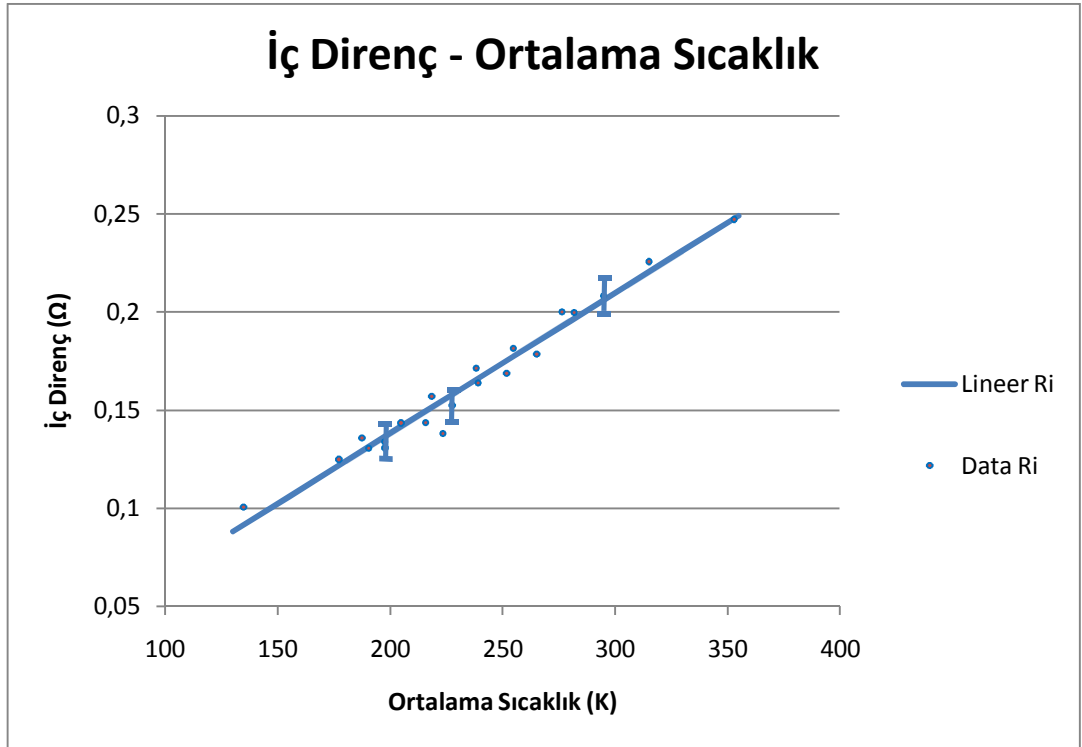
Çizelge 4.2 : Farklı deney durumları için veriler.

	T1	T2	ΔT	\bar{T}	V_0	I_{kd}	P_{max}	$V_0/\Delta T$	V_0/I_{kd}
Durum 2	201.9	173	28.9	187.45	0.303	2.229581	0.168131	0.010484	0.1359
Durum 1	150.5	119.2	31.3	134.85	0.2128	2.115308	0.112739	0.006799	0.1006
Durum 3	219.9	175.3	44.6	197.6	0.4794	3.577612	0.426482	0.010749	0.134
Durum 5	253.4	193.7	59.7	223.55	0.7121	5.152677	0.923528	0.011928	0.1382
Durum 4	207.7	146.7	61	177.2	0.625	5	0.771958	0.010246	0.125
Durum 6	221	160	61	190.5	0.7	5.359877	0.936935	0.011475	0.1306
Durum 7	240.5	169.1	71.4	204.8	0.9026	6.285515	1.419794	0.012641	0.1436
Durum 8	235	160.4	74.6	197.7	0.8658	6.619266	1.441234	0.011606	0.1308
Durum 9	258.1	173.5	84.6	215.8	1.1075	7.707029	2.152849	0.013091	0.1437
Durum10	270	185.1	84.9	227.55	1.1937	7.822412	2.336698	0.01406	0.1526
Durum12	284.6	193.6	91	239.1	1.3636	8.319707	2.874874	0.014985	0.1639
Durum14	300.4	203.2	97.2	251.8	1.515	8.969805	3.412672	0.015586	0.1689
Durum11	267.2	169.7	97.5	218.45	1.2359	7.861959	2.412401	0.012676	0.1572
Durum15	318	212.2	105.8	265.1	1.736	9.720045	4.249891	0.016408	0.1786
Durum13	293.4	183.2	110.1	238.3	1.5211	8.874562	3.39719	0.013816	0.1714
Durum17	337.8	225.6	112.2	281.7	1.9563	9.791291	4.792327	0.017436	0.1998
Durum16	314.9	194.7	120.2	254.8	1.8336	10.09692	4.641488	0.015255	0.1816
Durum18	343.3	209.3	133.9	276.3	2.2521	11.25487	6.348349	0.016819	0.2001
Durum19	368.4	221.2	147.2	294.8	2.5688	12.3263	7.902316	0.017451	0.2084
Durum20	394	236.2	157.8	315.1	3.0331	13.43268	10.13811	0.019221	0.2258
Durum21	444.1	261.9	182.1	353	3.4474	13.94015	11.88662	0.018931	0.2473

İç direnç değerleri Denklem 4.3 yardımıyla hesaplanmış ve elde edilen değerlere en uygun eğri olarak lineer bir doğru uydurulmuştur (Şekil 4.21). İç direnç ile ortalama sıcaklığın ilişkisi olan doğrunun denklemi, Denklem 4.4'te verilmiştir.

$$R_i = \frac{V_0}{I_{kd}} \quad (4.3)$$

$$R_i = 0.000714\bar{T} - 0.00434 \quad (4.4)$$

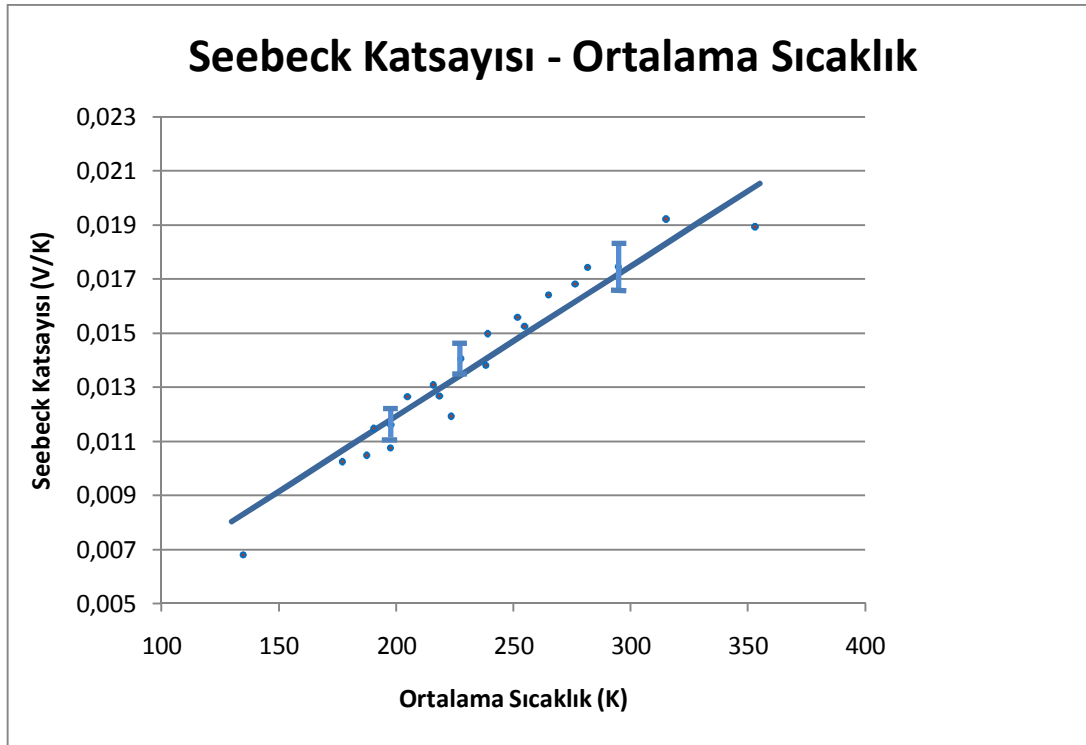


Şekil 4.21 : İç Direnç – Ortalama Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.21'teki grafikte görüldüğü gibi sıcaklığın artması ile termoelektrik modülün iç direnci artmakta ve buna bağlı olarak Joule kayıpları da artmaktadır. 3 farklı durum için deney durumları tekrarlandığında ortalama sapmanın 0.015 mertebesinde olduğu görülmüştür. Joule kayıplarını azaltmak için soğuk ortamda çalışmanın faydaları olmasına karşın, sıcaklık düşüğüyle ısı uyarılma enerjisi de düşeceğinden, soğuk ortamda çalışmanın toplam bir güç veya verim iyileşmesi sağlayacağı sadece iç direnç grafiğine bakılarak söylenemez.

4.7 HZ 20 Modül Deneyinin Seebeck Katsayısı - Ortalama Sıcaklık Grafiği

Termoelektrik jeneratörlerin karakteristik özellikleri içerisinde en önemli parametrelerden biri olan Seebeck katsayısının ortalama sıcaklık ile ilişkisi, deneysel karakterizasyon da büyük rol oynayacaktır. Üç farklı durum için deney koşulları tekrarlandığında ortalama sapmanın 0.0005 mertebesinde olduğu görülmüştür. Deney sırasında alınan verilere Matlab programında en uygun eğri uydurulmasıyla lineer bir doğru elde edilmiştir. Bu doğrunun denklemi, Denklem 4.5’de verilmiştir. Doğrunun grafiği Şekil 4.22’te verilmiştir.



Şekil 4.22 : Seebeck Katsayısı – Ortalama Sıcaklık grafiği.

$$\alpha = 0.000055616\bar{T} + 0.00079132 \quad (4.5)$$

Seebeck katsayısının ortalama sıcaklık ile lineer bağıntıda olduğu, sıcaklık yükseldikçe doğru orantılı olarak Seebeck katsayısının da yükseldiği ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla düşük sıcaklıklarda Seebeck etkisi azalmakta, termoelektrik jeneratörün ürettiği gerilim düşmektedir. Fakat daha önce de sıcaklığın düşmesiyle iç direncin düştüğü, dolayısıyla da gücün düşük sıcaklıklarda artabileceğine değinilmişti. Bu bilginin elde edilmesi Denklem 2.47’nin kullanımıyla gerçekleştirilmiş, sonuçlara Başlık 4.8 altında yer verilmiştir.

4.8 HZ-20 Modül Deneyinin Maksimum Güç – Ortalama Sıcaklık Grafiği

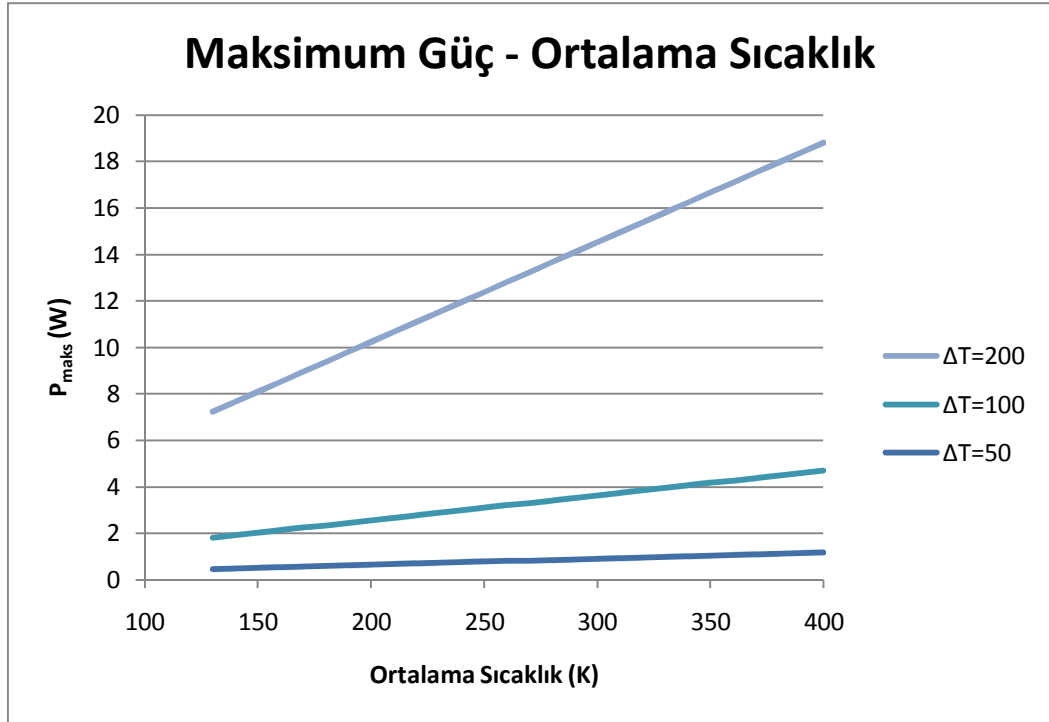
$$P_{maks} = \frac{\alpha^2}{4R_i} \cdot \Delta T^2 \quad (4.9)$$

Eğer Seebeck katsayısının ve iç direncin ortalama sıcaklık ile ilişkileri, maksimum güç ifadesi içerisindeki sıcaklık farkı hariç olarak yazılıp çözdürülürse;

$$\frac{\alpha^2}{4R_i} = 1.07116 \times 10^{-6} x (\bar{T} - 200) + 0.000256298 \quad (4.10)$$

Böylelikle istenilen sıcaklık farkında ve 400K altındaki istenilen ortalama sıcaklık değerinde HZ-20 modülü ve diğer Bi_2Te_3 termoelektrik jeneratörlerin, üreteceği maksimum güçte ne kadar kayıp olacağı Denklem 4.10 sayesinde bulunacaktır.

HZ-20 termoelektrik jeneratörü için $\Delta T = 200$, $\Delta T = 100$, $\Delta T = 50$ değerlerinde maksimum güç ifadesinin ortalama sıcaklık ile ilişkisi Şekil 4.23'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.23 : Maksimum Güç – Ortalama Sıcaklık grafiği.

5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

Hi-Z Technology Firmasının HZ-20 kodlu termoelektrik jeneratör modülünün kriyojenik sıcaklıklarda deneysel karakterizasyonu yapılmış, düşük sıcaklıklarda iç direncin azalmasıyla birlikte Joule kayıpları azalırken, Seebeck katsayısının daha fazla azalmasından ötürü, Bismuth Telluride tabanlı termoelektrik modüller için düşük sıcaklıklarda üretilebilecek maksimum gücün, ortalama sıcaklık ile beraber düştüğü gözlenmiştir.

Gelişmiş deney düzeneği ile 134K – 350K arası çok küçük sıcaklık farkları ile taranmış, dijital yük sayesinde minimal direnç değişimleriyle, modülün gerilim - akım karakteristikleri çıkarılmıştır. Bu değerler ile güç akım, güç yük direnci ve gerilim yük direnci bağıntıları kurulmuştur. Seebeck katsayısı ve iç direncin ortalama sıcaklık ile ilişkileri saptanmış ve buradan hareketle maksimum güç ile ortalama sıcaklık arasındaki bağıntı hesaplanmıştır. Çıkan denklem ortalama sıcaklığın azalmasıyla azalan bir doğruyu göstermiştir.

Çalışmanın en önemli kazanımı, maksimum gücün ortalama sıcaklık ile olan bu ilişkisinin saptanmasıdır. Böylelikle, Bismuth Telluride tabanlı termoelektrik jeneratörlerin kriyojenik sıcaklıklarda kullanılacağı çalışmalarda, ortalama sıcaklığa göre jeneratörün üretebileceği maksimum güç gerçekçi olarak hesaplanabilecektir.

Deney düzeneğine yerleştirilen sıkıştırma aparatı ile modül üzerine basıncın etkisi araştırılmış, basınç arttıkça ısı transferinin iyileştiği gibi, modülün sıcaklık değişimlerine cevap verme süresinin kısaldığı gözlenmiştir.

Deneyde kullanılmak istenen ısı akısı ölçer, sensörün ince olmasına karşın bakır plaka ile termoelektrik modül arasında yarattığı boşluk nedeniyle meydana gelen termal dirençten ötürü deney verilerini ihmal edilemeyecek şekilde etkilediği görülmüştür. Onun yerine deneyde bakır plaka yüzeyine freze ile açılan kanal içerisine yerleştirilen termokupllar ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Mevcut kriyojenik ısı değiştirici üzerindeki uygulama düzeneğinin tamamlanmasıyla yapılan ön deneyler ile gerçekçi verilerin ölçülmesini engelleyen bir dizi sorunun olduğu anlaşılmıştır.

Ölçümlerde kanatçıklı yüzeylerde havadan yeterli miktarda ısı absorbe edilemediği görülmüştür. Isı değiştiricisi içerisine sıvı azot yerine doymuş azot buharı gönderildiğinde bile, termoelektrik jeneratörler içerisinde ısıl denge oturmadan, kanatların yüzeyinde buzlanma başlamış, dolayısıyla ısı transferi gittikçe kötüleşmiştir.

Sıvı azotun rahat buharlaşması için dikey yapılmış olan ısı değiştiricisi, bu çalışmada kilit rolü oynayan kanatçıklı yüzeyden doğal taşınımınla gerçekleşen ısı transferinin iyileşmesi için ısı değiştiricinin yatay, kanatçıklı yüzeydeki kanatların ise dikey olması gerekmektedir. Ayrıca ısı değiştirici yüzeyinin de daha geniş olması, termoelektrik jeneratör üzerinden akacak olan ısının daha büyük bir alandaki kanatçıklı yüzeyden emilmesi gerekmektedir.

Termoelektriklerden gerekli gücün alınamamasının nedenlerinden bir diğeri ise termoelektrik modül yüzeylerinin yalıtkan kaplanırken yaşanan sorunlardır. Genelde termoelektrik modüller fabrikadan üzeri mika veya seramik katman kaplı şekilde satılmaktadır. Bu alışma için, modüller deney amaçlı olarak izolasyonsuz alınmıştır. İki yüzünün elektriksel olarak izole edilebilmesi için 2 katman ısı pastası sürülmüş ve 2 katman Kapton filmi yerleştirilmiştir. Her ne kadar dikkat edilse de laboratuvar ortamında elle yapılan çalışmalar nedeniyle Kapton malzemesiyle modül arasında hava kabarcıkları kalma ihtimali yüksektir. İlerideki çalışmalarda termoelektrik jeneratörlerin, fabrikadan seramik izoleli olarak alınması kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ackermann, R. A.**, 1997: Cryogenic Regenerative Heat Exchangers. Plenum, NY and LN.
- [2] **Barron, R. F.**, 1999: Cryogenic Heat Transfer. Taylor & Francis, PA.
- [3] **Decher, R.**, 1997: Direct Energy Conversion, Fundamentals of Electric Power Production. Oxford University Press, NY.
- [4] **Jha, A. R.**, 2006: Cryogenic Technology and Applications. Butterworth – Heinemann UK
- [5] **Knowlen, C., Mattick, A. T., Bruckner, A. P., and Hertzberg, A.**, 1998: High Efficiency Energy Conversion Systems for Liquid Nitrogen Automobiles. Aerospace and Energetics Research Program, University of Washington.
- [6] **Knowlen, C., Mattick, A. T., Hertzberg, A., and Bruckner, A. P.**, 1999: Ultra-Low Emission Liquid Nitrogen Automobile. Electric and Hybrid Electric Vehicles and Fuel Cell Technology (SP-1466). University of Washington.
- [7] **Kutasov, V. A.**, 1964: Thermoelectric Properties of Semiconductors. Consultants Bureau, NY
- [8] **MacDonald, D. K. C.**, 1962: Thermoelectricity, An Introduction to the Principles. John Wiley & Sons Inc, NY and LN.
- [9] **Ordonez, C. A.**, 1999: Liquid Nitrogen Fueled, Closed Brayton Cycle Cryogenic Heat Engine. Department of Physics, University of North Texas.
- [10] **Ordonez, C. A., and Plummer M.C.**, 1996: Cold Thermal Storage and Cryogenic Heat Engines for Energy Storage Applications. Departments of Physics and Engineering Technology, University of North Texas.
- [11] **Sun, W., Hu, P., Chen, Z., Jia, L.**, 2004: Performance of Cryogenic Thermoelectric Generators in LNG Cold Energy Utilization. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China.
- [12] **Volk, J. A.**, 1999: Cryogenic Thermoelectric Generator. United States Patent, No: 6166317 dated 18.02.1999.
- [13] **Vollaro, A. L., Grignaffini, S., Gugliermetti, F.**, 1998: Optimum Design of Vertical Rectangular Fin Arrays. University of Rome.
- [14] **Weisend II, J. G.**, 1998: Handbook of Cryogenic Engineering. Taylor & Francis, USA.

- [15] <<http://www.wikipedia.org>>
- [16] <http://www.frigprim.com/frigus_natsink.html>
- [17] <<http://www.hi-z.com/hz2.php>>
- [18] <<http://www.tellurex.com>>
- [19] <<http://www.ni.com>>
- [20] <<http://www.aa.washington.edu/AERP/CRYOCAR/Cryocar.htm>>
- [21] <<http://www.mtse.unt.edu/CooLN2Car.html>>
- [22] <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/technology_comparisons/>

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Anıl ÜNSAÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: 18 . 10 . 1983

Adres: Şemsettin Günaltay cad. Kaya Sultan sok. Fazlıoğlu
apt. No : 5/10 Kozyatağı / İSTANBUL

Öğrenim: 2006 - Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
(Onur derecesi)

2002 – Kadıköy Anadolu Lisesi