

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KRİYOJENİK GÜÇ YEDEKLEME SİSTEMİ İÇİN TESLA TÜRBİNİ
TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Bedrettin DUMAN**

Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji

Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KRİYOJENİK GÜÇ YEDEKLEME SİSTEMİ İÇİN TESLA TÜRBİNİ
TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYSSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Bedrettin DUMAN
(301081004)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Günümüzde enerjinin üretilmesi kadar sürekliliği de hayati derecede önem arz eder hale gelmiştir. Enerjinin sürekliliğini sağlamak maksadı ile güç yedekleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut güç yedekleme sistemlerinin, özellikle batarya kullanılanları olmak üzere büyük çoğunluğu çeşitli sıkıntılar doğurmaktadır. Söz konusu güçlükler sebebi ile, güç yedekleme sistemleri çözümleri için yeni arayışlara gidilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında; bir güç yedekleme sistemi alternatifi olarak düşünülen rejeneratif Kriyojenik Güç Yedekleme Sistemi(KGYS) için bir Tesla Türbini tasarlanmış, üretilmiş ve deneysel karakterizasyonu yapılmıştır. İleride bu veya benzer konularda çalışacak olan herkes için faydalı olmasını temenni ederim.

Yapılan bu çalışma süresince, güven ve desteklerini esirgemeyen başta tez danışmanım sayın Prof. Dr. Altuğ Şişman'a, veri toplama ve analizi konusunda bilgilerini ve tecrübelerini paylaşmaktan çekinmeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Burak Barutçu'ya ve Tesla Türbininin üretilmesi için tesis ve imkanlarını kullanmam konusunda tereddüt etmeyen ALŞA Laboratuar Cihazları Ltd. Şti'ne teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2010

Bedrettin Duman

Gemi Mak. ve İşletme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Güç Yedeklemeye Duyulan İhtiyaç	1
1.2 Kriyojenik Güç Yedekleme.....	3
1.3 Literatürde Bu Konuda Yapılanlar	4
1.4 Tez Kapsamında Yapılanlar; Elde Edilen Temel Sonuç ve Kazanımlar	6
2. TEMEL BİLGİLER.....	9
2.1 Kriyojenik Akışkanlar ve Termodinamik Özellikleri	9
2.1.1 Gazların Özgül Isıları.....	10
2.1.2 Sıvıların Özgül Isıları.....	13
2.1.3 Katıların Özgül Isıları	15
2.2 Azotun Termodinamik ve Transport Özellikleri	17
2.3 Sistemde Kullanılan Kriyojenik Cihaz ve Ekipmanlar	18
2.3.1 Kriyojenik Depolama Sistemleri	19
2.3.2 Kriyojenik Isı Değiştiriciler	20
2.3.3 Kriyojenik Valfler.....	22
2.4 Kriyojenik Isı Yalıtım Malzemeleri.....	23
2.4.1 Kapalı Olarak Genleştirilmiş Hücrelerden Oluşan Köpük	24
2.4.2 Gaz Doldurulmuş Toz(granül malzeme) ve Lifli Malzemeler.....	25
2.4.3 Vakumlanmış Toz(granül malzeme) ve Lifli Malzemeler.....	26
2.4.4 Matlaştırılmış Toz(granül malzeme) Yalıtım.....	26
2.4.5 Mikro kürecikler	27
2.4.6 Çok Tabakalı Yalıtım(MLI)	27
2.5 Kriyojenik Güç Sistemleri.....	28
2.6 Tesla Türbini	30
2.6.1 Çalışma Prensibi	32
2.6.2 Tesla Türbini ile İlgili Temel Bağlıntılar	35
2.6.2.1 Sınır Tabaka Kalınlığı	38
2.6.2.2 Rotor için Kritik Devir Hızı.....	38
2.6.2.3 Rotor Disklerinde Oluşan Yapısal Gerilmeler.....	41
2.6.3 Tesla Türbini'nin Sektörel Uygulamaları	42
3. SİSTEMİN TERMODİNAMİK MODELLEMESİ.....	43
3.1 KGYS'nin Termodinamik Süreç Temelinde Değerlendirilmesi	43
3.2 Farklı Basınç Değerleri için Nozulun Değerlendirilmesi.....	47

3.3	KGYS'nin İzotropik ve İzotermal İş Kapasitesi	50
3.4	KGYS'nin İşletme Maliyeti	51
4.	TESLA TÜRBİNİNİN KARAKTERİSTİKLERİ VE TASARIMI.....	55
4.1	Türbinin Karakteristik Özellikleri	55
4.2	Türbini Oluşturan Parçalar	56
5.	TESLA TÜRBİNİNİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU	63
5.1	Ölçülecek Parametreler	63
5.2	Ölçüm Sistemi	64
5.3	Yapılan Ölçümlere Ait Sonuç ve Grafikler	73
5.4	Türbinin Ölçüm Sonuçlarına Göre Genel Değerlendirmesi	77
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	81
	KAYNAKLAR.....	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

KGK	: Kesintisiz Güç Kaynağı
KGYS	: Kriyojenik Güç Yedekleme Sistemi
NBP	: Normal kaynama noktası (Normal Boiling Point)
MLI	: Çok tabakalı yalıtım (Multi layer insulation)
RPM	: Dakikadaki devir adedi (Revolution per minute)
SIVL	: Süper izole vakumlu hat (Super insulated vacuum line)
TT	: Tesla Türbini
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquefied Petroleum Gas)
TEG	: Termoelektrik jeneratör (Thermoelectric Generator)
kWh	: KiloWatt-Saat
NI	: National Instruments
PSI	: İnçkare başına paund (Pound per Square Inch)
BNC	: Radyo frekans sinyal taşıma kablosu (Bayonet Neil-Concelman)
RS-232	: Sinyal aktarımı için seri bağlantı portu(Recommended Standard-232)
PT-100	: 100 kod numaralı platin termometre (Platinum Thermometer)
DC	: Doğru akım (Direct Current)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1 Kriyojenlerin bazı fiziksel özellikleri	9
Çizelge 2.2 Bazı gazların ideal gaz özgül ısıları	11
Çizelge 2.3 Hidrojen gazının 1 Atm ve denge halindeki özgül ısısı	12
Çizelge 2.4 Bazı maddelere ait Debye sıcaklıkları.....	16
Çizelge 2.5 Sıvı azotun termodinamik ve transport özellikleri.....	17
Çizelge 2.6 Gaz azotun termodinamik ve transport özellikleri.....	18
Çizelge 2.7 Bazı köpüklerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri.....	25
Çizelge 2.8 Bazı toz ve lifli malzemelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri.....	26
Çizelge 2.9 Vakumlanmış toz ve lifli malzemelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri	26
Çizelge 2.10 Vakumlanmış mat malzemelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri.....	27
Çizelge 2.11 Boyutları 15 ile 135 mikro metre arasındaki mikro küreciklere ait yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri	27
Çizelge 2.12 Bazı MLI'ların ısı iletkenlik değerleri	28
Çizelge 3.1 Farklı giriş basınçlarındaki giriş ve çıkış entalpileri, entropileri, kütsel debi ve özgül iş miktarları	45
Çizelge 3.2 Farklı giriş basınçları için gerekli olan hacimsel debi ve 2 kW güçte sekiz saatlik çalışma için gerekli olan azot miktarları	47
Çizelge 3.3 İzentropik genişleme durumunda farklı giriş basınçları için ortaya çıkan nozul çıkış hızları.....	49
Çizelge 3.4 Farklı giriş basınçları için farklı birimlerde hesaplanan isentropik ve izotermal iş miktarları.	51
Çizelge 3.5 Farklı giriş basınçları için hesaplanan işletim maliyetlerine ait değerler.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Kriyojenik rejeneratif güç yedekleme sistemi prensip şeması.....	4
Şekil 2.1	Doymuş sıvı He-4'ün(He-II) sıcaklığa bağlı özgül ısı eğrisi.....	14
Şekil 2.2	Devar kabı ve kriyojen aktarma sistemi.	19
Şekil 2.3	KGYS'de kullanılan kriyojenik tank.	20
Şekil 2.4	KGYS'de kullanılan ısı değiştiricilerin kanat ve kanal yapısı.	21
Şekil 2.5	Üzerinde buzlanma meydana gelmiş kriyojenik ısı değiştirici.	22
Şekil 2.6	Kriyojenik bir valfin kısımları.....	23
Şekil 2.7	Kullanımı yaygın olan toz yalıtım malzemeleri a) Perlit b) Vermikülit.	25
Şekil 2.8	Üretilen TT ve TT miline akuple yüksek frekanslı alternatör.	31
Şekil 2.9	Yüksek açısal hızda oluşması öngörülen akış yolunun basit gösterimi... ..	32
Şekil 2.10	Katı yüzeyde akış halinde sınır tabaka oluşumu.	33
Şekil 2.11	TT'nin rotoru ve birbirine 1.5 mm aralıkla dizilmiş rotor diskleri.	34
Şekil 2.12	Ağırlık merkezi dönme ekseninden kaçık hale gelen rotorda dönme esnasında oluşan sehimin basit gösterimi.	40
Şekil 3.1	Temel Rankine çevrimine ait T-S diyagramı.	43
Şekil 3.2	Temel Rankine çevrimine ait P-V diyagramı.....	44
Şekil 3.3	KGYS evaporatörünün üretici firma tarafından verilen özellikleri.....	46
Şekil 3.4	TT nozulunun solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.	48
Şekil 4.1	Tesla Türbini ve miline akuple alternatör.....	56
Şekil 4.2	TT mahfazasının solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı... ..	57
Şekil 4.3	TT'ne ait gövdenin solidworks programında çizilen resmi ve fotoğrafı.	57
Şekil 4.4	TT'ne ait gövdenin dikey kesit resmi.	58
Şekil 4.5	TT'ne ait milin solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.	58
Şekil 4.6	Disk grubu ve milin birlikte çekilmiş fotoğrafı.....	59
Şekil 4.7	Nozulun solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.....	59
Şekil 4.8	Türbini oluşturan parçaların genel görünüşü.	60
Şekil 5.1	Veri toplamada kullanılan NI BNC 2210 bağlantı panelleri.....	65
Şekil 5.2	NI PCI-6229 Veri toplama kartı.	66
Şekil 5.3	Gerilimin okunması amacı ile oluşturulan gerilim bölücü.	66
Şekil 5.4	Akım ölçümü amacı ile kullanılan şönt direnç ve BNC bağlantısı.	67
Şekil 5.5	Labview programında oluşturulan veri toplama ve işleme yazılımı.	67
Şekil 5.6	5.5 numaralı şekilde verilen yazılımın ön paneline ait fotoğraf.....	68
Şekil 5.7	Debi kontrolörü öncesi yapılan bağlantılar, egzoz ve tahliye hatları.	69
Şekil 5.8	Debi kontrolörünün önden görünüşü.....	69
Şekil 5.9	Debi kontrolörü verilerini toplayan yazılıma ait blok diyagram.....	70
Şekil 5.10	Şekil 5.9'da verilen ölçüm yazılımının ön paneli.....	70
Şekil 5.11	Gerilimin doğrultulmasında kullanılan köprü doğrultucu.	71
Şekil 5.12	Kullanılan köprü doğrultucunun şematik gösterimi.	71
Şekil 5.13	Elektro-Atomatik EL 9080-200 elektronik DC yük.	72
Şekil 5.14	Üretilen gücü göstermek amacı ile lambalarla yapılan pano.	73
Şekil 5.15	TT'ne ait güç-RPM grafiği.	74
Şekil 5.16	TT'ne ait tork-RPM grafiği.....	75

Şekil 5.17 TT'ne ait Güç-İzentropik verim grafiği.....	76
Şekil 5.18 TT'ne ait Güç-Hacimsel debi grafiği.	77

SEMBOL LİSTESİ

T	: Sıcaklık
P	: Basınç
S	: Entropi
R	: Evrensel gaz sabiti
R	: Çap
U	: Gerilim
I	: Akım
C_p	: Sabit basınçta ki özgül ısı
C_v	: Sabit hacimde ki özgül ısı
B_t	: Isıl genleşme katsayısı
f	: Moleküllerin serbestlik derecesi
f	: Sürtünme katsayısı
f	: Frekans
Θ_R	: Karakteristik rotasyon sıcaklığı
h	: Planck Sabiti (6.626×10^{-34} J.s)
h	: Entalpi
I	: Molekülün atomlararası eksene dik olan eksene göre atalet momenti
k	: Boltzmann Sabiti
k	: İletimle ısı geçiş katsayısı
k	: Özgül ısılar oranı (C_p/C_v)
Θ_D	: Debye sıcaklığı
ρ	: Özgül kütle
γ	: Özgül ağırlık (ρg)
μ	: Dinamik viskozite
ν	: Kinematik viskozite
ν	: Poisson oranı
h	: Entalpi
Pr	: Prandtl Sayısı
σ_L	: Yüzey gerilmesi
σ_R	: Radyal gerilme
σ_T	: Teğetsel gerilme (kayma gerilmesi)
Re	: Reynolds sayısı
V	: Hız
D_h	: Hidrolik çap
D_{eff}	: Efektif hidrolik çap
L	: Hidrolik uzunluk
A	: Alan
a	: TT rotor diskleri arasındaki mesafe
F	: Kuvvet
F_u	: Birim deplasman(sehim) başına kuvvet
m	: Kütle
y	: Deplasman (sehim)
l	: Ağırlık merkezinin dönme eksenine göre konumu
W	: İş

δ	: Sınır tabaka kalınlığı
φ	: Açı
ω	: Açısal hız
n_p	: Çift kutup sayısı
n_k	: Kritik açısal hız
N	: Dakikada devir sayısı (RPM)
η_s	: İzentropik Verim
kS	: Kilo sembol
s	: Saniye
Ω	: Direnç(Ohm)
\dot{V}	: Hacimsel debi
\dot{m}	: Kütlesel debi

KRİYOJENİK GÜÇ YEDEKLEME SİSTEMİ İÇİN TESLA TÜRBİNİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bilim ve teknoloji alanında, geride bıraktığımız son yüzyıl boyunca, tüm insanlık tarihinde elde edilenden daha fazla ilerleme kaydedilmiştir. Elde edilen bu gelişmeler sonucunda insanlığın hizmetine sunulan bir çok uygulama günümüzde vazgeçilmez bir hale gelmiştir. Özellikle haberleşme uygulamaları olmak üzere, askeri uygulamalar, bilişim, bankacılık ve tıbbi uygulamalarda kullanılan sistemlerin çalışmalarına her ne koşulda olursa olsun devam edebilmeleri hedeflenmektedir. Bu sistemlerin sürekli olarak çalışabilmeleri kesintisiz güç kaynakları ile sağlanmaktadır. Kesintisiz güç kaynakları yapılarına ve çalışma prensiplerine göre farklılık göstermektedirler. Diğer taraftan mevcut kesintisiz güç kaynağı sistemlerinin belli uygulamalarda kullanılmaları bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlara örnek olarak; akü kullanımından doğan atık ısının bertaraf edilmesinde karşılaşılan güçlükler, akü grubunun ömrünün sınırlı olması sebebi ile yenilenmeye ihtiyaç duyması, akülerin ancak tam doluluk oranının %40'ına kadar deşarj edilebilmeleri, jeneratör kullanılması durumunda şebekede meydana gelen kesinti miktarına bağlı olarak yakıt ikmali gerekliliği ve bu sistemlerin piyasada kolay alıcı buluyor olması sebebi ile çalınma riskleri gösterilebilir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan rejeneratif Kriyojenik Güç Yedekleme Sistemi(KGYS); şebekeden beslenerek havayı(azot) sıvılaştırıp depolamak ve şebeke elektriği kesildiği anda devreye girerek yaklaşık iki günlük süre boyunca bir baz istasyonu sistemi tarafından ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamak üzere tasarlanmıştır. Sistem; bir gaz sıvılaştırma, depolama ve basınçlandırma birimi, bir ısı değiştirici üzerine monte edilmiş termoelektrik jeneratör gurubu, basınçlı gaz(azot) ile tahrik edilen jeneratör ve kontrol sisteminden meydana gelmektedir. Yapılan çalışma kapsamında bu sistemde ana güç üretici olarak görev yapan Tesla türbini tasarlanmış, üretilmiş ve deneysel olarak karakterizasyonu yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen tecrübe ve veriler ileride yapılacak olan geliştirme çalışmalarında kullanılacaktır.

DESIGN,MANUFACTURE, AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF A TESLA TURBINE FOR THE CRYOGENIC POWER BACKUP SYSTEM

SUMMARY

Progress, which has been achieved in the field of science and technology during the last century is more than that of the whole history of mankind. Many of the applications which have been assigned to service of mankind as a result of those advances have been turned into essentials for the World today. Systems used in some areas, especially communication applications, and defense technologies, information technology, banking and medical applications aimed to continue their operation in any condition. Continuous operation of these systems is supplied by using uninterruptible power supply systems. Uninterruptible power supply systems have differences due to their structure and working principle. On the other side, there are some difficulties which could be faced by using available power backup systems in particular applications. Some examples of those troubles are disposal of waste heat produced by batteries and replacement need of those because of their limited service life and limited supply capability which is around the limit of 40% over full charge capacity. As another example in case of using a generator, there will be a fuel replenishment need depending on the duration of black out in the grid and there is a pilferage risk because of those mentioned systems can easily be sold in the market.

Regenerative Cryogenic Power Backup System which is studied here is designed to liquefy and store the air(nitrogen) by using the grid supply and aimed to feed a mobile telephone base station during two days operation when the grid is offline. The system consists of a gas(nitrogen) liquefaction, storage and pressurization unit, a thermoelectric module group which is placed on a cryogenic high pressure resistant heat exchanger, a generator unit which is driven by pressurized gas(nitrogen) and a control unit. In the extent of this study, a Tesla turbine which serves as a main power generator for the system is designed, manufactured and characterized experimentally. Datas and experiences which have been obtained as a result of this application are going to be used to develop more effective and powerfull Tesla turbines.

1. GİRİŞ

1.1 Güç Yedeklemeye Duyulan İhtiyaç

Günümüzde teknolojinin sunduğu imkanlar yoğun olarak kullanılmakta ve bu her geçen gün daha da vazgeçilmez bir hal almaktadır. Haberleşme sektörü başta olmak üzere askeri uygulamalar, bankacılık, tıp ve bilişim teknolojileri alanında enerjinin sürekliliği hayati önem taşımaktadır. Bahsedilen uygulamalarda görev yapan sistemlerin şebekede meydana gelen kesintiler süresince de çalışmalarını için güç yedeklemeye yani enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji depolama amaçlı kullanılan sistemler Kesintisiz Güç Kaynağı(KGK) olarak adlandırılmaktadırlar. KGK'lar yapılarına göre farklılık göstermekle beraber bazı uygulamalar için mevcut güç yedekleme sistemlerinin kullanımı sorunları da beraberinde getirmektedir.

Güç yedekleme sistemlerine özellikle haberleşme uygulamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal afetler gibi acil durumlarda mobil haberleşme sistemlerinin kesinlikle görevlerine devam edebilmeleri istenmektedir. Örneğin deprem kuşağında bulunan ülkemizde depremin meydana gelmesinden sonra enkaz altında kalanlara ulaşmaya çalışan kurtarma ekipleri dahi mobil telefonlarla haberleşmektedirler. Diğer taraftan, bu gibi afet durumlarında; büyük ihtimalle sabit telefon şebekesi kullanılamayacağından, enkaz altında kalmış olsun veya olmasın mobil haberleşme hemen herkes için elzem bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Mobil telefonların kullanılmasının hayati derecede önem kazandığı bu ve buna benzer durumlarda mobil telefon şebekesi baz istasyonlarının çalışmalarına, şebekede elektrik kesintisi olması durumunda da en azından iki gün süre ile devam edebilmeleri istenmektedir. İşte bu noktada mevcut KGK sistemleri mecburen kullanılıyor olsalar dahi yetersiz kalmaktadırlar. Bahsedilen baz istasyonları gibi sistemlerin kendi başlarına çalışmalarını sürdürebilmeleri yani bakım, kontrol, ikmal ve yenilenmeye en az düzeyde ihtiyaç duyar yapıda olmaları istenmektedir. Enerji beslemesi konusunda otonomi sağlamak maksadı ile sadece aküler kullanılabilir. Jeneratör kullanılması durumunda sistemin yakıt ikmaline ihtiyaç duyması sebebi ile sistem yine bir dış müdahaleye ihtiyaç duymaktadır. Fakat akülerin kullanıldığı durumda da

baz istasyonun ihtiyaç duyduğu enerjinin miktarı düşük olmasına karşın örneğin 2 günlük otonomi süresi için yedekleme yapılması hedeflendiğinde, kullanılan akülerin sayısı artmakta ve bu miktardaki akü gurubunun baz istasyonunun muhafaza edildiği dar hacime sığdırılmaları mümkün olmamaktadır. Diğer taraftan akülerin çalışması esnasında sıcaklıkları artmakta ve baz istasyonunun elektronik sistemlerinin ve akülerin performanslarının sıcaklıktan negatif yönde etkilenmeleri sebebi ile sistemin soğutulması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu ihtiyaç soğutma işi için kullanılacak bir enerji gereksinimini daha beraberinde getirmektedir. Ayrıca akülerin kullanım ömürlerinin sınırlı olması yenilenmelerini gerektirmekte ve bu durumda yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan kullanılamaz hale gelen akülerin bertaraf edilmesi çevresel açıdan önemli bir sorun teşkil etmektedir. Sayılan tüm bu sebeplerden dolayı aküler kullanılarak sadece birkaç saatlik güç yedeklemesi yapabilmek mümkün olmaktadır. Oysa baz istasyonları gibi sistemler için en az iki gün süre ile otonomi sağlanmasına gerek vardır. Özellikle yerleşim bölgelerine yakın olmayan istasyonların yaşadıkları enerji kesintileri de nispeten uzun olduğundan KGK kapasiteleri de yüksek olmak zorundadır.

Diğer taraftan Dünya enerji konusunda hiç bir zaman olmadığı kadar sıkıntılı dönemler yaşamaktadır. Enerji gereksinimini karşılama amacı ile kullanılan çeşitli kaynaklar mevcut olmakla beraber bunların en yaygın kullanılanı halen fosil yakıtlardır. Fosil yakıtların çevre kirliliği konusunda ortaya çıkardığı problemler ve nükleer enerjinin de fosil yakıtlar kadar olmasa da atıkların bertarafı ve depolanması problemleri nedeni ile oldukça masraflı olması sebebi ile yenilenebilir kaynaklara yönelmek Dünyanın ve ekolojik sistemin devamı açısından elzem hale gelmiştir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının varlığı düzensiz ve depolanmalarında oldukça zordur. Bu konu üzerine söylenilebilecek çok şey olmasına karşın ifade edilmesi gereken en önemli nokta enerji depolamanın halen bir sorun olarak karşımıza çıktığıdır.

Bahsedilen sebeplerden dolayı yeni ve daha yüksek kapasiteli güç yedekleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı eksiklerinin gerekli şekilde giderilmesi ile Kriyojenik Güç Yedekleme Sistemi(KGYS) enerji depolama konusunda iyi bir alternatif haline gelebilecek potansiyele sahiptir.

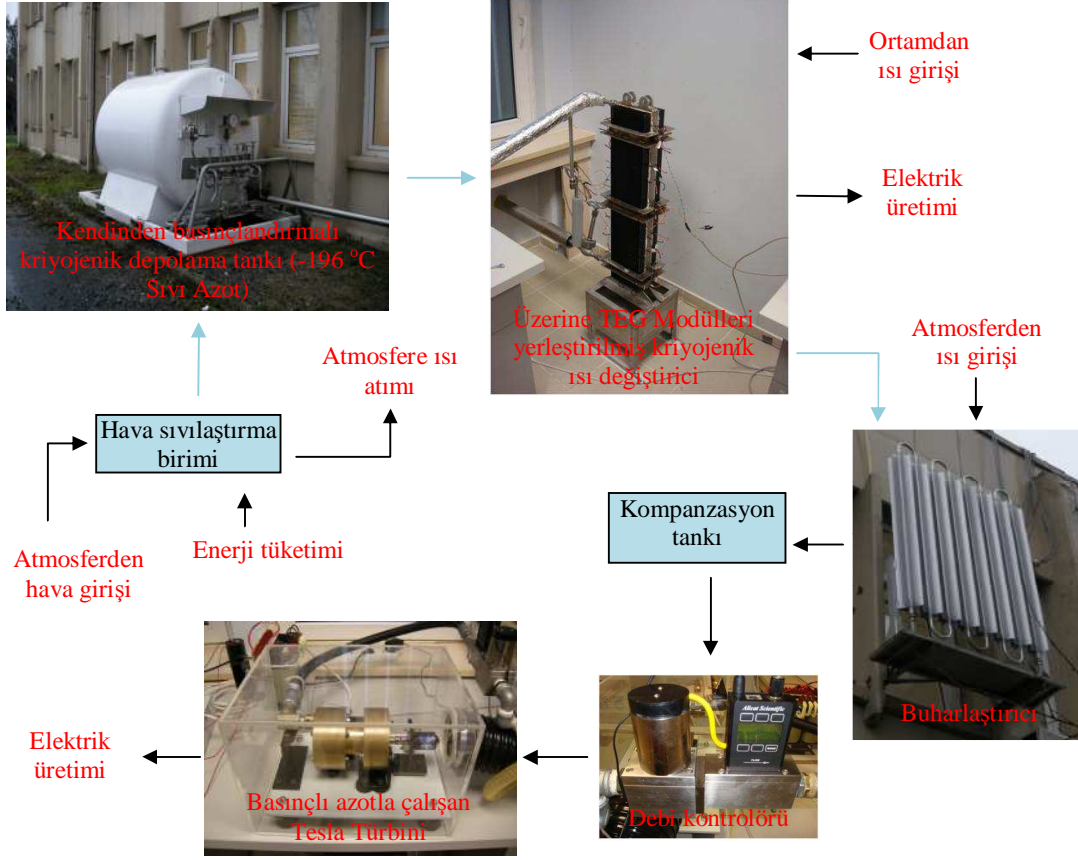
1.2 Kriyojenik Güç Yedekleme

Kriyojenik güç yedekleme hakkında bilgi vermeden önce kriyojenik kelimesinin anlamından bahsetmek gerekmektedir. Kriyojenik sözcüğü sıcaklığın 123 Kelvin(-150 °C) ve altında olduğu fiziksel olay ve sistemleri ifade etmekte kullanılır[1]. Bu denli düşük sıcaklık değerlerinde katılaşmayan çok az madde bulunmaktadır. Örnek olarak helyum, hidrojen, azot, oksijen, argon gibi normal sıcaklıklarda gaz fazında bulunan maddeler gösterilebilir. 123 Kelvinden daha düşük sıcaklıklarda sıvı halde bulunan bu maddeler aynı zamanda kriyojen olarak adlandırılmaktadırlar.

Kriyojenik güç yedeklemesi kavramı; benzer şekilde güç üretimi örnekleri mevcut olmakla beraber güç yedekleme amacı temelinde ilk defa uygulamaya geçirilmeye çalışılan bir konudur. Kriyojenik güç yedekleme; kriyojenik akışkanları bahsedilen düşük sıcaklık seviyelerinde muhafaza etmenin zor olması sebebi ile gerçekleştirilmesi oldukça zor bir husustur. Depolama konusunda karşılaşılan güçlükler ve çözüm yöntemlerinden ileride bahsedilecektir.

KGYS azot gazının sıvılaştırılarak depolanması ve şebekede kesinti meydana gelmesi durumunda devreye girerek yaklaşık 2 kW güç gereksinimi olan bir sisteme minimum 2 gün süre ile enerji sağlaması amaçlanarak tasarlanmıştır. Kriyojenik sıvıdan basınçlı gaz üretimi ve basınçlı gazın kullanımı sonucu elektrik elde edilmesi KGYS'nin temel iki sürecini oluşturmaktadır. Bu süreçlerin meydana gelmesinde karşılaşılan güçlükler ve uygulanan çözüm yöntemlerinden ilerleyen kısımlarda detaylı olarak bahsedilecektir.

Planlanan KGYS sekiz ana birimden meydana gelmektedir. Bunlar; azot sıvılaştırma birimi, kendinden basınçlandırıcılı depolama birimi, üzerine termoelektrik jeneratörler eklenmiş olan ısı değiştirici, buharlaştırıcı, kompanzasyon tankı(buffer tank), akış kontrol birimi, basınçlı gaz ile sürülen Tesla Türbini ve türbinin tahrik ettiği yüksek frekanslı alternatördür. Şebekede kesinti olması durumunda atmosfer sıcak ısı kaynağı ve sıvılaştırılmış azot soğuk ısı kaynağı olarak görev yapacak ve bu iki kaynak arasında akan ısı ilk olarak ısı değiştirici üzerine monte edilmiş termoelektrik jeneratörler ve ardından buharlaşan azot ile sürülen türbin yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülecektir. Bahsedilen güç yedekleme sisteminin, termoelektrik jeneratörler ve Tesla Türbini vasıtası ile toplamda 2 kW güç üretmesi planlanmaktadır.



Şekil 1.1 : Kriyojenik rejeneratif güç yedekleme sistemi prensip şeması.

Şekil 1.1 de kriyojenik rejeneratif güç yedekleme sistemine ait prensip şeması görülmektedir. Sistemin sıvılaştırma birimi ve kompanzasyon tankı başta finansal sebepler olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı mevcut sistemde yer alamamışlardır. Prensip şemasında görülen gaz sıvılaştırma ünitesinin sistemin bir elemanı haline gelebilecek şekilde tasarlanması ve KGYS'nin rejeneratif bir sistem haline gelmesi ileri ki çalışmalarda gerçekleştirilmeye çalışılacak olan bir başka konudur. Ayrıca sistemin daha kararlı bir şekilde çalışması için gerekli olan kompanzasyon tankının ileride sisteme eklenmesi planlanmaktadır. Şekil 1.1'de genel olarak gösterilen sistemin ana güç üreteci olan Tesla Türbini'nin tasarımı, üretimi ve deneysel karakterizasyonu ise bu çalışmanın asıl konusudur.

1.3 Literatürde Bu Konuda Yapılanlar

Tesla Türbini(TT); daha çok alternatif akım ve indüksiyon motorlar konusunda yaptığı araştırmaları ve buluşları ile ünlü olan Nikola Tesla(1856-1943) tarafından 1913 yılında bulunmuştur[10]. Bu makine hemen hemen aynı dönemde ortaya çıkmış ve

geliştirilmeye başlamış olan ve günümüzde de türbin piyasasına büyük ölçüde hakim olmuş aksiyon, aksiyon-reaksiyon türbinlerinden tamamen farklı bir çalışma prensibi ve yapıya sahip olması ve bu türbinlere kıyasla çok daha kolay üretilbilir olması ile dikkat çekmiştir. Nikola Tesla ilk olarak 22 kW gücünde, çalışma akışkanı olarak basınçlı hava kullanan bir türbin geliştirmiş, bundan bir kaç sene sonra da yaklaşık 150 kW gücünde, çalışma akışkanı olarak buhar kullanan, daha büyük bir türbini kendi imkanları ve Allis Chalmers şirketinin yardımları ile geliştirmiştir[12]. Geliştirilen 2. prototipin, belli bir süre çalıştırdıktan sonra yüksek açılma hızına bağlı olarak rotor disk çaplarında genişleme gösterdiği fark edilmiştir. Bunun sebebi türbinin geliştirildiği zaman diliminde ulaşılabilen malzemelerin metalurjik özelliklerinin ihtiyaca cevap verebilir nitelikte olmamasıdır. Bunun üzerine Allis Chalmers şirketi Tesla'yı desteklemekten vazgeçerek aksiyon, aksiyon-reaksiyon tipi türbinlere yönelik geliştirme çalışmaları yürütmeye başlamıştır. Nikola Tesla'nın kendi zamanının en az 1 yüzyıl ilerisinde kabul edilen ve halen de üzerinde çalışmalar yürütülen birçok buluşu ve araştırma çalışması vardır[13]. Belki de kendisine dezavantaj oluşturan en önemli nokta bu araştırmalarını eş zamanlı yürütmesi ve ticari olarak gelişmeye daha az çaba göstermesidir. Tesla, sözü edilen bu sebeplerden dolayı kendi imkanları ile çalışmalarına devam edememiş ve büyük kaynaklar aktardığı türbin geliştirme çalışmasına son vermek zorunda kalmıştır. Tesla'nın ürettiği ilk prototiplerin özgül makine gücü;(makinenin birim ağırlığı başına üretilen güç değeri) bu makineye rakip olarak görülen diğer türbinlere göre oldukça yüksek olduğundan ve Tesla tarafından ulaştırılması mümkün verim değerleri olarak %95 gibi yüksek rakamlar gösterildiğinden, kanatsız türbin kavramı bulunuşundan bu yana sürekli bir ilgi konusu olmuştur. İkinci Dünya Savaşından sonra ilerleyen malzeme bilimine bağlı olarak daha yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı mümkün olmaya başlamış ve 1950'li yıllardan başlayarak TT üzerine araştırmalar yapılmıştır[9,11,12,14-19]. Yapılan bu çalışmalarda; ilk ürettiği prototipler için Nikola Tesla tarafından bildirilen yüksek verim ve güç değerlerine ulaşılmaya çalışılmış fakat elde edilen değerler % 50 değerini geçememiştir[18]. Literatürde rastlanılan en yüksek verim değeri 120000 RPM hızda %49 olarak karşımıza çıkmaktadır[15]. Özellikle Prof. Warren Rice tarafından yapılan araştırmalarda, Nikola Tesla'nın ulaştığı verim ve güç değerlerini elde edebilmek için birçok türbin geliştirilmiş fakat ne Tesla'nın ürettiği güç ne de verim değerlerine yaklaşamamıştır. Prof. Rice tarafından yazılan Tesla Turbo Makineleri adlı yayında disk rotorun ulaşabileceği maksimum tersinir verimin % 95'lerin üzerine çıkabileceği fakat TT mahfazası içinde verimli nozullar yapabilmeyenin

çok zor olması sebebi ile oluşan kayıpların genel verimi olumsuz etkilediği belirtilmektedir[14]. Bazı kaynaklarda; TT'nin gelecekte çok yaygın kullanım alanı bulacağı ve bu nedenle TT ile ilgili kaydedilen ilerlemelere ait verilerin birçok araştırmacı ve kurum tarafından gizli tutulduğu söylenmektedir.

1.4 Tez Kapsamında Yapılanlar; Elde Edilen Temel Sonuç ve Kazanımlar

Yapılan tez çalışması; bir türbin imalatı ve deneysel karakterizasyonu ile birlikte türbinin görev yaptığı kriyojenik sistemle alakalı genel konuları da içermektedir. Tez çalışması süresince yapılanlar sıralanılacak olursa; ilk olarak basınçlı gaz elde etmek amacı ile Arıtış Firması tarafından kriyojenik bir tank inşa edilmiş, ardından üzerinde termoelektrik jeneratörler bulunan ısı değiştiriciye basınçlı sıvı azot taşıyacak SIVL(super insulated vacuum line) hattı aynı firma tarafından döşenmiştir. Ardından Arıtış firması tarafından üretilmiş olan evaporatör, ısı değiştiricisini takip eden hat üzerine monte edilmiştir. Evaporatörden sonra devam eden hat üzerine; debi, sıcaklık ve basınç, değerlerini ölçebilmek amacı ile bir debi kontrolörü bağlanmıştır. Ardından gerekli ekipmanlar kullanılarak, imal edilen türbinin sisteme bağlantısı yapılmıştır.

Son olarak; Labview programında oluşturulan veri toplama yazılımı yolu ile ölçüm sistemi kurulmuş ve data kartı ve benzeri ekipmanlardan faydalanılarak deneysel veriler elde edilmeye başlanmıştır. Yukarıda sözü edilen elemanlar ve ölçüm sistemi ile ilgili olarak ilerleyen başlıklar altında detaylı bilgi verilmektedir.

Tezin temel bilgiler kısmında yukarıda adı geçen sisteme basınçlı gaz sağlayan elemanlar ve bunların özellikleri anlatılmıştır. Enerjinin depolandığı sistem olan kriyojenik tank ve kriyojenik sistemlerle alakalı genel bilgiler verilmiştir. Ardından sistemin termodinamik modeli kurularak elde edilecek güç çıktısını etkileyen parametreler hesaplanmıştır.

Türbinin tasarımı ve imalatı konusunda yapılan çalışmalar detaylı olarak anlatılmış ve sistem bünyesinde çalışan prototipe ait çizimler ve diğer karakteristik veriler aktarılmıştır. Anlatılan sistemin kurulması ve çalışır hale gelmesinden sonra Tesla Türbininin karakterizasyonu yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda turbine ait verim, tork, hava tüketimi, rpm değeri, maksimum güç ve maksimum sürekli güç değerleri analiz edilmiş ve bu değerlere bağlı olarak; tork-açısal hız, güç-açısal hız, maksimum güç-hacimsel debi, verim-güç grafikleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan bu çalışma kapsamında kriyojenik güç yedekleme sisteminin bir prototipi elde edilmiş ve bu sayede kriyojenik sistemlerle alakalı bilgiler edinilmiştir. Ayrıca güç üretimi ve yedeklemesi konusunda tecrübe kazanılmıştır. Yapılan çalışmanın başından sonuna kadar çok çeşitli zorluklarla karşı karşıya gelinmiş ve bu sorunların çözümü sağlanılarak ileride yapılması planlanan çalışmalarda kullanılacak deneyimler elde edilmiştir. Ayrıca imal edilen Tesla Türbini 30000 rpm gibi yüksek hızlarda çalışabilmektedir ve bu kadar yüksek devir hızlarında çalışan makinelerin imalatında ve işletilmesinde göz önünde bulundurulması gereken; yataklama, mukavemet, titreşim ve benzeri birçok önemli nokta bulunmaktadır. Üretilen Tesla türbini yüksek devirli bir makine üretimi konusunda önemli tecrübeler kazanılmasını sağlamıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

İmal edilen Tesla türbini konvansiyel buhar çevrimi olan Rankin çevrimine göre çalışmakla beraber; sistemde iş gören akışkan bu çevrimlerde genel olarak kullanılan su değil azottur. Azot gazı kriyojen olarak depolanmakta ve ihtiyaç halinde basınçlandırılıp kızdırılarak enerji üretilmesini sağlamaktadır. Sistem kriyojenik özellikte olduğundan bu kısımda kriyojenik akışkanlar ve kriyojenik sistemlerle ilgili konulara değinilecektir.

2.1 Kriyojenik Akışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri

Kriyojenik kelimesi 123 K(-150 °C) sıcaklık değerinden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen olayları ifade etmek için kullanılmaktadır. Belirtilen bu sıcaklık değerinden daha düşük sıcaklıklarda katılaşmadan sıvı halde bulunan maddelere de kriyojenik akışkan veya kısaca kriyojen denilmektedir[1]. Helyum, hidrojen, azot, oksijen ve argon kriyojenlere örnek olarak verilebilecek belli başlı maddelerdir. Kriyojenlerin elde edilmesi kriyojenin türüne göre değişmekle beraber; temelde gazın sıkıştırılarak dış ortama ısı vermesi ve düşük basınç değerlerine genişletilmesi ile soğuyarak sıvılaştırılması esasına dayanır. Bazı kriyojenlerin normal kaynama noktasındaki termofiziksel özellikleri çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Kriyojenlerin bazı fiziksel özellikleri(@NBP 1 atm veya 101.3 kPa)[1].

Kriyojen	Normal Kaynama Noktası (K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Buharlaştırma Gizli Isısı (kJ/kg)	Özgül Isı (kJ/kg-K)	Vizkozite (mPa-s)	Isıl İletkenlik (W/m-K)
He-3	3,191	50,9	8,49	4,61	0,0016	0,0171
He-4	4,214	124,8	20,91	4,48	0,0035	0,0272
Hidrojen	20,272	70,7	443,12	9,68	0,0132	0,1185
Neon	27,091	1206,1	85,91	1,83	0,1301	0,1130
Azot	77,362	807,3	199,31	2,05	0,1580	0,1396
Hava	78,801	874,1	205,01	1,96	0,1681	0,1410
Argon	87,281	1394,2	161,91	1,13	0,2520	0,1232
Oksijen	90,181	1141,1	213,01	1,69	0,1901	0,1514
Metan	111,701	414,1	512,02	3,46	0,1180	0,1931

Kriyojenik sıcaklıktaki bir akışkanın bu sıcaklıklarda muhafaza edilmesi konusunda bazı güçlüklerle karşılaşmaktadır. Akışkan sıcaklığı ile en düşük ortam sıcaklığı arasında bile ciddi boyutta bir fark olmasından dolayı kriyojene sürekli olarak bir ısı geçişi söz konusudur. Şayet kriyojenin muhafaza edildiği depolama ekipmanları çok yüksek performanslı ısı izolasyonuna sahip değilse kriyojenlerin sıvı halde muhafazası mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı kriyojenik uygulamalarda ısı yalıtımı dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biridir. Kriyojenik ısı yalıtım sistemlerine ilerleyen başlıklar altında yer verilmektedir. Ayrıca kriyojenik sıcaklıklarda malzemelerin taşınım özellikleri de ciddi anlamda değişken olduğundan bu tür sistemlerle ilgili hesaplar yapılırken bu değişkenlik göz önünde bulundurulmalıdır. Bahsedilen bu değişkenlik farklı fazlar için ayrı ayrı ele alınacaktır.

2.1.1 Gazların Özgül Isıları

Malzemelerin, sabit basınçta (c_p) ve sabit hacimde (c_v) olmak üzere iki farklı özgül ısıları vardır. Bu iki özgül ısının farkını veren genel ifade aşağıda 2-1 numaralı denklemde verildiği gibidir.

$$c_p - c_v = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \quad (2-1)$$

Denklemdaki iki kısmi diferansiyel ifadenin ilki gazın termal genişleme katsayısı β_t ile ilgilidir.

$$\beta_t = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \quad (2-2)$$

Kritik basınç değerlerinin %10'undan daha düşük basınç değerlerindeki gazlar aşağıda belirtilen ideal gaz modeline göre değerlendirilebilir.

$$pv = RT \quad (2-3)$$

Şayet molar birimler kullanılırsa gaz sabiti R gerçekten bütün maddeler için aynı olan evrensel gaz sabiti olur ve değeri 3,3145 J/mol-K e eşittir. İdeal gaz hal denklemi (eşitlik 2-3) özgül ısı farkını belirtmek için eşitlik 2-1 de kullanıldığında yani gazın ideal gaz olduğu kabul edildiğinde özgül ısı farkı evrensel gaz sabitine eşittir.

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

Özgül ısılar farkı gerçek gazlar için hem sıcaklığa hem de basınca bağlı olarak değişir. Diğer taraftan ideal kabul edilen bir gazın özgül ısı değerleri basınçtan bağımsız fakat sıcaklığa bağımlı şekilde değişir. Mutlak vakuma çok yakın basınç ve 300 K sıcaklıkta bazı gazların sahip oldukları ideal gaz özgül ısıları ve bu gazlara ait evrensel gaz sabiti 2.2 numaralı çizelgede görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Bazı gazların ideal gaz özgül ısıları(çok düşük basınç ve 300 K sıcaklıkta) [1].

Gaz	C_p kJ/kg-K	C_v kJ/kg-K	R kJ/kg-K	C_p / C_v
Helyum	5,19	3,12	2,077	1,667
Hidrojen	14,21	10,08	4,124	1,409
Neon	1,03	0,61	0,412	1,667
Azot	1,03	0,74	0,297	1,401
Hava	1,01	0,71	0,287	1,402
Argon	0,52	0,31	0,208	1,667
Oksijen	0,92	0,66	0,261	1,393
Metan	2,23	1,71	0,519	1,303

Gazların özgül ısılarının sıcaklığa bağlı olarak değişken özellikte olmasının fiziksel nedeni, atomların farklı sıcaklıklarda farklı şekilde enerji ihtiva etmeleridir. Klasik eşdağılım teoremine göre, atomların ihtiva ettikleri enerji değişik enerji türlerine eşit olarak paylaştırılmış şekilde bulunur. Eşdağılım teoremine göre sabit hacimdeki özgül ısı aşağıdaki gibi gösterir.

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

Bu eşitlikte f terimi, maddeyi meydana getiren moleküllerin serbestlik derecesini gösterir. Monoatomik gazlar için (Helyum, neon, argon) dikkate alınabilecek tek enerji depolama şekli molekülün kinetik enerjisindeki geçici değişimlerdir. Monoatomik gazlar için özgül ısılar $c_v = 3/2R$ ve $c_p = 5/2R$ şeklindedir ve bu ifadelerin geçerliliği ortam sıcaklığı ve daha yüksek değerler için deneysel olarak ta kanıtlanmıştır. Aslında helyum gazının özgül ısısı ortam sıcaklığından 2000 K sıcaklığa kadar hemen hemen sabittir. Eşit dağılım teoremine göre belirlenene özgül ısılar oranı c_p/c_v monoatomik gazlar için $5/3$ 'tür [1].

Diatomik ve daha fazla bileşen içeren gazlarda, diğer enerji biçimlerine de rastlanılabilir. Örneğin azot molekülleri iki karşılıklı dikey eksen civarında dönebilir, bundan dolayı iki atomlu gazlar için ek olarak iki döngüsel serbestlik derecesi mevcuttur. İki atomlu moleküller için özgül ısılar $c_v = 5/2 R$ ve $c_p = 7/2R$ 'dir [1].

Gerçekte, döngüsel enerji depolama biçimleri süresizdirler ve şayet gaz sıcaklığı bunu sağlamaya yetecek kadar düşükse gaz kütlelerinde döngüsel enerji depolama gerçekleşmez. Bu durumun en belirgin şekilde görüldüğü gaz hidrojenidir. 2.6 numaralı eşitlikte ifade edilen karakteristik rotasyon sıcaklığı Θ_R ile gösterilir ve bu sıcaklığın üçte birinden daha düşük sıcaklıklarda gaz molekülünün dönüşü ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Söz konusu bu sıcaklığın iki katından daha büyük sıcaklıklarda ise molekülün döngüsel hareketi belirginleşmeye başlar.

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

Bu formülde; h Planck sabitini (6.625×10^{-34} J-s), I molekülün atomlar arası eksene dik olan eksene göre atalet momentini, k simgesi ise Boltzmann sabitini (1.3805×10^{-23} J/K) gösterir.

İki atomlu gazların büyük çoğunluğu döngüsel hareketin başladığı sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda bile halen sıvı fazda olduklarından yani bu sıcaklık değeri çok düşük olduğundan bu gazlarda her zaman döngüsel harekete bağlı enerji depolama mevcuttur. Azotu ele alacak olursak azotun karakteristik rotasyon sıcaklığı $\Theta_{R\text{nitrojen}} = 2.86$ K'dir ve normal kaynama noktası 77.36 K'dir(bkz çizelge 2.1), buradan da anlaşılacağı üzere mutlak sifira çok yakın bölgelerde bile döngüsel hareket vardır. Dolayısı ile sıvı faz ve gaz fazında her zaman döngüsel hareket görülür. Ancak bu durum, hidrojen gazında diğer gazlara nazaran daha yüksek bir sıcaklıkta meydana gelmektedir. Hidrojen gazının 1 Atm basınç altında ve denge durumunda sahip olduğu özgül ısılar 2.3 numaralı çizelgede verilmektedir.

Çizelge 2.3 : Hidrojen gazının 1 Atm ve denge halindeki özgül ısıları [1].

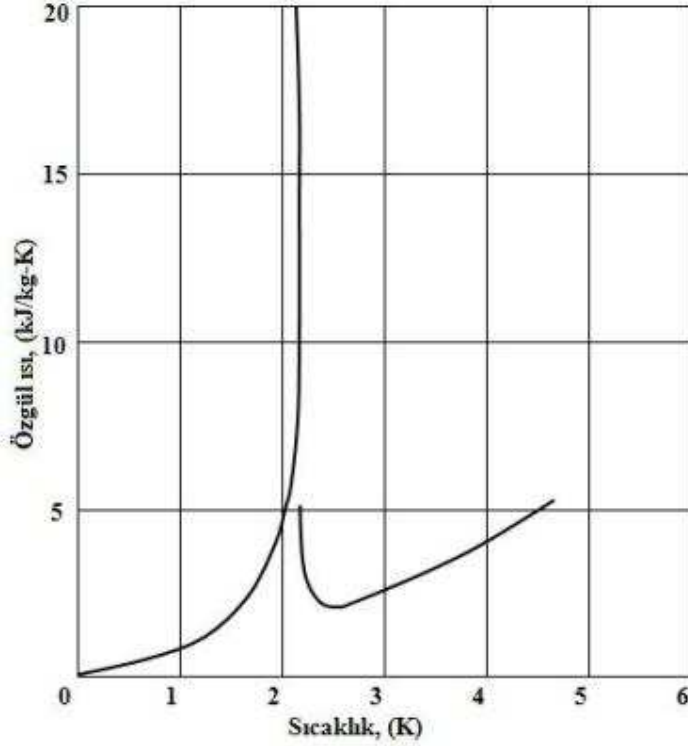
Sıcaklık K	C_p kJ/kg-K	C_v kJ/kg-K	C_p / C_v	C_p / R
20.3	12.154	6.504	1.869	1.577
40	10.356	6.231	1.662	1.511
60	10.511	6.385	1.646	1.548
80	10.730	6.605	1.625	1.601
100	11.141	7.015	1.588	1.701
150	12.408	8.283	1.498	2.008
200	13.451	9.326	1.442	2.261
250	13.946	9.821	1.421	2.381
300	14.221	10.095	1.409	2.447

Hidrojen molekülünün atalet momentinin küçük olmasından dolayı hidrojen gazının karakteristik rotasyon sıcaklığı normal kaynama sıcaklığının(20.3 K) çok üstünde ki 85.4 K'dir. Bu nedenle hidrojen gazında döngüsel hareket diğer iki atomlu gazlardan farklı olarak yaklaşık 30 K civarında oldukça yüksek bir sıcaklıkta başlar. Sıcaklığın 30 K'nin altına indiği durumlarda hidrojen atomunun sahip olduğu enerji sadece atomun doğrusal hareketinden kaynaklanan kinetik enerjidir. Buna bağlı olarak bu bölgedeki sıcaklıklarda hidrojen gazının özgül ısı evrensel gaz sabiti R'nin 1.5 katıdır. 30 K'nin üzerinde sıcaklığın artmasına bağlı olarak döngüsel hareket kademeli olarak oluşmaya başlar. Sıcaklığın 30 K'den başlayarak 255 K'e doğru yükselmesi ile gazın özgül ısı da kademeli olarak gaz sabitinin 2.5 katına ulaşır. Kriyojenik sıcaklıklarda meydana gelen transport özelliklerindeki değişim hidrojen gazının gösterdiği davranış ile belirgin şekilde anlaşılmaktadır. Bu nedenle kriyojenik uygulamalarda özgül ısı değişimleri özellikle ısı geçişi uygulamalarında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Hidrojenin sıcaklığa bağlı olarak özgül ısısında meydana gelen değişim çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

2.1.2 Sıvıların Özgül Isıları

Katı ve gaz fazlarına ait makul düzeyde veri olmasına karşın, fiziksel özelliklerin daimi olmaması sebebi ile sıvı fazı için elde edilen tutarlı verilerin miktarı oldukça sınırlıdır. Sıvı fazında atomlar kaynama noktasına yakın sıcaklık bölgelerinde gaz fazına benzer ısıl davranışlar gösterirlerken, donma sıcaklığına yakın bölgelerde de katıların fiziksel özelliklerine yakın özelliklere sahip olurlar [1].

Sıvıların özgül ısıları kritik noktaya yakın olmamak kaydı ile sıcaklıktan neredeyse bağımsızdır. Kriyojenik akışkanların(kriyojen) büyük çoğunluğu normal kaynama noktası civarında yükselen sıcaklıkla beraber çok az bir özgül ısı düşümü gösterirler. Helyum; geçmişte sıvı fazında enerji depolama mekanizmaları için kapsamlı anlayış geliştirme araştırmalarının konusu olmuştur. Helyumun iki izotop formu mevcuttur; bunlardan birincisi genel olarak kullanılan He-4, ikincisi ise daha az rastlanılan He-3 izotopudur. Şekil 2.1'de He-4 izotopuna ait sıcaklığa bağlı özgül ısı eğrisi gösterilmektedir. Lambda noktası olarak adlandırılan 2.171 K sıcaklıktaki nokta üzerinde He-4 konvansiyonel(normal) sıvı gibi davranış gösterir. Lambda noktasında sıvı-sıvı geçiş fazı gözlenir.



Şekil 2.1 : Doymuş sıvı He-4'ün(He-II) sıcaklığa bağlı özgül ısı eğrisi[1].

Lambda noktasının altındaki sıcaklıklardaki sıvı He-4 normal akışkan ve süperakışkan He-4'ün karışımı gibi davranır. He-4'ün süperakışkan olarak adlandırılmasının sebebi bu akışkanın viskozitesinin ve entropisinin 0 oluşudur. Helyum bu güne dek keşfedilmiş bütün maddeler içinde bu özelliğe sahip olan tek örnektir. Bu özellik sebebi ile helyum, süper akışkanlık özelliğini muhafaza edebileceği sıcaklıkdüzeyinde kaldığı müddetçe içinde aktığı kanalın fiziksel özelliklerinden bağımsız şekilde herhangi bir sürtünme kaybına bağlı basınç düşümü göstermeden sevk edilebilir. Bunun anlamı helyumun süper akışkanlığının devam etmesi koşulu ile hareket etmeye başladığı bir hacimde hiç durmadan hareket edeceğidir. Bunun yanısıra helyumun, üzerinde bulunduğu yüzeye yapışma kuvveti, Dünyanın çekimi altında aluşan ağırlığından fazladır. Bu nedenle süperakışkan fazında olması durumunda dikey bir yüzeye herhangi bir dış kuvvete ihtiyaç duymadan yayılabilir. Helyumun bu özelliği parçacık hızlandırıcılarda kullanılan süper iletken yapıları elektromıknatısların soğutulmasında oldukça faydalı olmaktadır. Helyumun yukarıda bahsedilen özellikleri sebebi ile parçacık hızlandırıcı sistemlerin soğutulmasında vazgeçilmez bir süper soğutkan olmasını sağlamıştır.

Süperakışkan He-4, He-II olarak adlandırılmaktadır. He-II'de lambda noktası yakınlarında meydana gelen özgül ısı değişimlerinin ana sebebi kuantalanmış girdapların yaptığı döngüsel hareketlerdir (rotasyon). Çok düşük sıcaklıklarda, atomların titreşimsel enerjileri atomun enerjisinin çoğunu oluşturur. 0.6 K'den daha düşük sıcaklıklarda doymuş He-II'nin özgül ısısı aşağıdaki ifadelerle ifade edilebilir.

$T \leq 0.6 \text{ K}$ için

$$c_v = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 = 233.78R (T/\Theta_D)^3 \quad (2.7)$$

R = gaz sabiti He-4 için = 2.077 kJ/kg-K

Θ_D = Debye sıcaklığı He-4 için = 28.63 K

$0.6 \text{ K} \leq T \leq 1.08 \text{ K}$ için

$$c_v = 98.625R (T/\Theta_R)^{6.7} \quad (2.8)$$

$1.08 \text{ K} \leq T \leq 2.17 \text{ K}$ için

$$c_v = 9.955R (T/\Theta_R)^{5.6} \quad (2.9)$$

Θ_R = roton sıcaklığı = 8.65 K

2.1.3 Katıların Özgül Isıları

Katılar için sabit hacim ve sabit basınçta belirlenen özgül ısılar arasında çok küçük bir fark bulunur. Bu iki özelliğin hemen hemen aynı olması sebebi ile çoğu zaman özgül ısı alt simge olmaksızın sadece c simgesi ile gösterilir.

Termodinamiğin üçüncü kanunu gereğince bütün malzemelerin özgül ısuları 0'a yaklaşır ve katıların da normal şartlarda sıcaklıktan çok az etkilenen özgül ısuları düşük sıcaklıkla beraber ciddi anlamda değişme gösterir.

Boltzmann 1871 yılında enerjinin eşit dağılım prensibine dayanarak, Dulong ve Petit'nin 1819 yılında geliştirmeye çalıştığı katıların özgül ısı bağıntılarını destekler nitelikte bir çalışma ortaya koymuştur. Dulong ve Petit'nin modeline göre katıların özgül ısısı katı içinde 6 serbestlik seviyesinde titreşen atomlarla ilişkilidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$c_v = 3R \quad (2.10)$$

Bu yaklaşım normal sıcaklıklarda yaklaşık %10'luk bir farkla doğru veriler sağlasada kriyojenik sıcaklıklardaki değerleri kestirmekte yetersiz kalmaktadır.

Einstein 1907’de katıların özgül ısılarının sıcaklık bağımlılığını açıklayabilmek için basit bir kuantum mekaniği modeli kullandı. Einstein’ın modelinde katı içindeki titreşen atomların enerji seviyelerini ölçmek için basit bir bağımsız harmonik osilatör düşünülmüştü. Bu model özgül ısının sıcaklıkla değişimini normal sıcaklıklarda tutarlı bir şekilde ifade etse de kriyojenik sıcaklıklarda kaydedilen deneysel verilerle farklı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Debye Einstein’ın modelini bağımsız şekilde titreşmeyen osilatörler kullanarak geliştirmiştir. Debye modeli katılar içindeki titreşime bağlı özgül ısı değişimi için oldukça doğru bağıntılar ortaya koymaktadır. Daha doğru ve ve daha fazla karmaşık modeller geliştirilmiş olsa da Debye modeli sıcaklığın katıların özgül ısılarına etkisi konusunda temel teşkil etmektedir.

Debye modeli katı atomlarının titreşimi sonucu katıda depolanan enerjiyi ifade etmektedir. Tek atomlu kristal yapıdaki bir katının özgül ısısı Debye modeline göre ifadesi 2.11 numaralı eşitlikte verilmektedir.

$$c_v = \frac{9 R T^3}{\Theta_D^3} \int_0^{\Theta_D} \frac{x^4 e^{-x} dx}{(e^x - 1)^2} \quad (2.11)$$

Yukarıda ki ifadede Θ_D simgesi karakteristik Debye sıcaklığını temsil eder ve malzemenin kendine has bir özelliğidir. Bazı maddelerin Debye sıcaklıkları 2.4 numaralı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Bazı maddelere ait Debye sıcaklıkları [1].

Malzeme	Θ_D K	Malzeme	Θ_D K
Alüminyum	389	Nikel	375
Krom	439	Niyobyum	250
Bakır	309	Platin	225
Elmas	1850	Silikon	630
Altın	180	Gümüş	220
Grafit	1500	Tantal	244
α -Demir	429	Beyaz sac	164
γ -Demir	429	Gri sac	240
Kurşun	86	Titanyum	350
Civa	95	Zirkonyum	280

2.2 Azotun Termodinamik ve Transport Özellikleri

Azot dünya atmosferinin %78'ini oluşturması sebebi ile oldukça rahat ulaşılabilen ve birçok uygulamada kullanılan bir maddedir. Atmosferden elde edilen azot; havanın distile edilerek ayrıştırılması veya ters ozmoz yöntemi ile hava içindeki gazlardan ayrılması ile üretilir. Azot gazı inert ortam sağlamak amacı ile kullanılan gazların başında gelir. Kimyasal yapısı nedeni ile kirletici, patlayıcı, yanıcı vb. olmaması sebebi ile birçok alanda kullanılır. Örneğin paslanmaz çeliklerin sıcak şekillendirilmeden çıktıktan sonra belirli bir süre soğumaya bırakıldıkları ortamlar azot gazı ile inert edilirler. Patlaması veya içindeki gazı kaçırmaması durumunda yangın tehlikesi yaratabilecek lastik, balon, basınç hücresi vb. yapılar azotla doldurulurlar. Diğer taraftan azot elementi protein molekülü oluşumunda görev yapar ve bundan dolayı canlıların metabolizmalarında belirli oranda azot bulunur. Satürn'ün uydusu Titan'ın atmosferinde oldukça yüksek miktarda moleküler azot bulunur. Ayrıca, yıldızlar arası uzayda da varlığı David Knauth ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarla saptanmıştır [27]. Azot miktarı itibarı ile atmosferin yakıcı özellikte olmamasını sağlar fakat konsantrasyonu belirli bir seviyenin üstüne çıktığında sarhoşluk, baygınlık ve boğulma sebepli ölümlere neden olabilir. Sıvı azotun bazı termodinamik ve transport özellikleri çizelge 2.5'te verilmektedir.

Çizelge 2.5 : Sıvı azotun termodinamik ve transport özellikleri [2].

Sıcaklık (K)	P_{sat} (kPa)	ρ_f (kg/m ³)	C_p (kJ/kg-K)	μ (μ Pa-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	214,1	3.52	11.66	0.00470
70	38.5	840,1	2.024	220	149.9	208.3	2.97	10.48	0.00504
75	76,1	818.1	2.042	173	143,1	202.3	2.47	9.35	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	771,1	2.088	119	129.3	188.7	1.92	7.18	0.00650
90	359.8	745.6	2.122	104	122.4	180.9	1.80	6.12	0.00723
95	539.8	718.6	2.171	93	115.5	172,1	1.74	5.08	0.00816
100	777.8	689.6	2.242	85	108.5	161.6	1.75	4.04	0.00942
105	1083.1	657.7	2.351	78	101.1	149.4	1.81	-	0.01119
110	1467.2	621.7	2.533	73	93.6	135,1	1.97	-	0.01394
115	1939.4	579.3	2.723	68	84.7	117.3	2.19	-	0.01884
120	2512.9	524.9	2.921	65	74.6	94.3	2.54	-	0.03051
125	3204.4	436.8	3.124	62	61.5	54.9	3.14	-	-

Azot elementi 1 atmosfer(101,325 kPaskal) basınç altında, 63,15 K'de ergimeye başlar ve 77,36 K'de kaynar. Gaz azota ait termodinamik ve transport özellikleri çizelge 2.6'da verilmektedir.

Çizelge 2.6 : Gaz azotun termodinamik ve transport özellikleri [2].

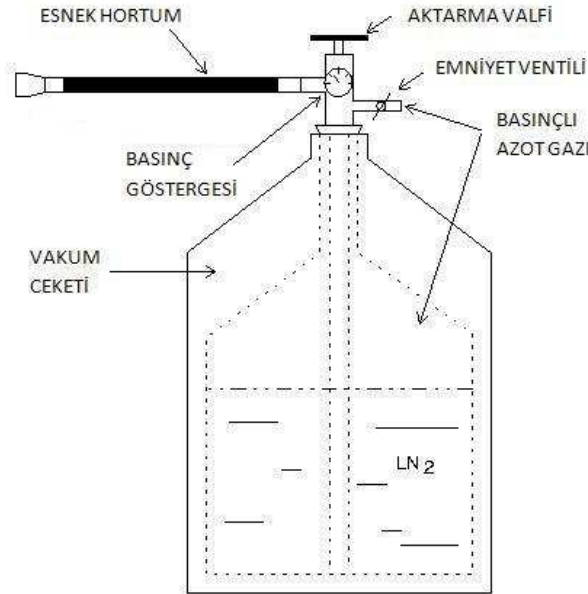
Sıcaklık (K)	P_{sat} (kPa)	ρ_g (kg/m ³)	C_p (kJ/kg-K)	μ (μ Pa-s)	k (mW/m-K)	h_{fg} (kJ/kg)	Pr
65	17.4	0.911	1.056	4.62	6.12	214,1	0.797
70	38.5	1.893	1.064	4.95	6.58	208.3	0.801
75	76,1	3.532	1.076	5.29	7.03	202.3	0.810
77,36	101.3	4.604	1.084	5.41	7.23	199.3	0.811
80	136.7	6.071	1.095	5.62	7.49	195.8	0.822
85	228.4	9.789	1.131	5.94	7.95	188.7	0.844
90	359.8	15.027	1.185	6.27	8.41	180.9	0.885
95	539.8	22.211	1.279	6.61	8.86	172,1	0.953
100	777.8	31.901	1.407	6.98	9.33	161.6	1.053
105	1083.6	44.931	1.593	7.54	10.16	149.4	1.182
110	1467.2	62.570	1.880	8.26	11.14	135,1	1.394
115	1939.4	87.211	2.361	9.32	12.59	117.3	1.751
120	2512.9	124.44	3.292	10.27	13.91	94.3	2.430
125	3204.4	197.08	5.860	12.86	16.69	54.9	4.511

2.3 Sistemde Kullanılan Kriyojenik Cihaz ve Ekipmanlar

Tesla türbinini süren(tahrik eden) basınçlı azotun elde edildiği sistemin ana bileşeni kendinden basınçlandırıcı kriyojenik depolama tankıdır. Bunun haricinde tankın basınçlanmasını sağlayan basınçlandırıcı da ayrı bir ekipman olarak ele alınabilir. Tankın kendinden basınçlı bir tank olmasını sağlayan ünite kriyojenik bir ısı değiştirici ve basınç kontrollü bir valften meydana gelmektedir. Tankta istenilen basınç seviyesini koruyabilmek maksadı ile basınç kontrollü valf basıncın düşüşüne bağlı olarak bir miktar sıvı azotu ısı değiştiriciye gönderip buharlaşmasını sağlayarak tank basıncının tekrar istenilen seviyeye gelmesini sağlar. Kendinden basınçlandırmalı tankın üzerinde aynı zamanda basınç ve kriyojen seviye göstergeleri bulunmaktadır. Tanktan azotun sıvı halde alınarak sevk edilmesini sağlayan SIVL hattı sistemin diğer bir bileşenidir. Bu süper izole vakum hattı oldukça düşük bir ısı geçirgenliğe sahip olduğundan azotun sıvı halde aktarılmasını sağlayabilmektedir. Bu hattın bağlandığı üzerine TEG modülleri monte edilmiş kriyojenik ısı değiştirici ve bu hat üzerinde ki çeşitli valf ve göstergeler sistemi oluşturan diğer bileşenlerdir. Devam eden bölümlerde bu bileşenlere ait bilgiler ve çalışma prensiplerinden daha detaylı şekilde bahsedilecektir.

2.3.1 Kriyojenik Depolama Sistemleri

Kriyojenler çok düşük sıcaklıkta sıvı halde bulduklarından dolayı, muhafaza edildikleri ortamların ısı yalıtım performansları yüksek olmak zorundadır. Gazların sıvılaştırılmaya çalışıldığı ilk zamanlarda bu imkanı sağlayan saklama koşulları olmadığından gaz sıvılaştırması konusunda ilerleme kaydedilememiştir. 1892 yılında James Dewar tarafından kriyojen depolamaya imkan sağlayan çift cidarlı yapıda bir kap geliştirilmiştir. Dolayısı ile bu kaplar dewar kabı olarak adlandırılmaktadırlar. Dewar kabının yapısı temelde aralarındaki hacmin vakumlanması ile elde edilen iç içe geçmiş aynı formda iki kaptan ibarettir. Şekil 2.2’de bir Dewar kabının yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2 : Dewar kabı ve kriyojen aktarma sistemi.

Temelde Dewar kabının yapısı aynı kalmakla birlikte vakumlanan bölgeye perlit gibi çeşitli izolasyon malzemeleri doldurularak veya aralarındaki küçük boşlukların vakumlandığı vakum battaniyesi denilen veya çok tabakalı yalıtım (MLI) ekipmanları ile daha yüksek performanslı yalıtım seviyelerine ulaşılmıştır. KGYS sisteminde kullanılan kriyojenik tank ise vakumlanmış bölgeye perlit doldurularak izole edilmiştir. Arıtış firması tarafından üretilen bu tank şekil 2.3’te görülmektedir.



Şekil 2.3 : KGYS’de kullanılan kriyojenik tank.

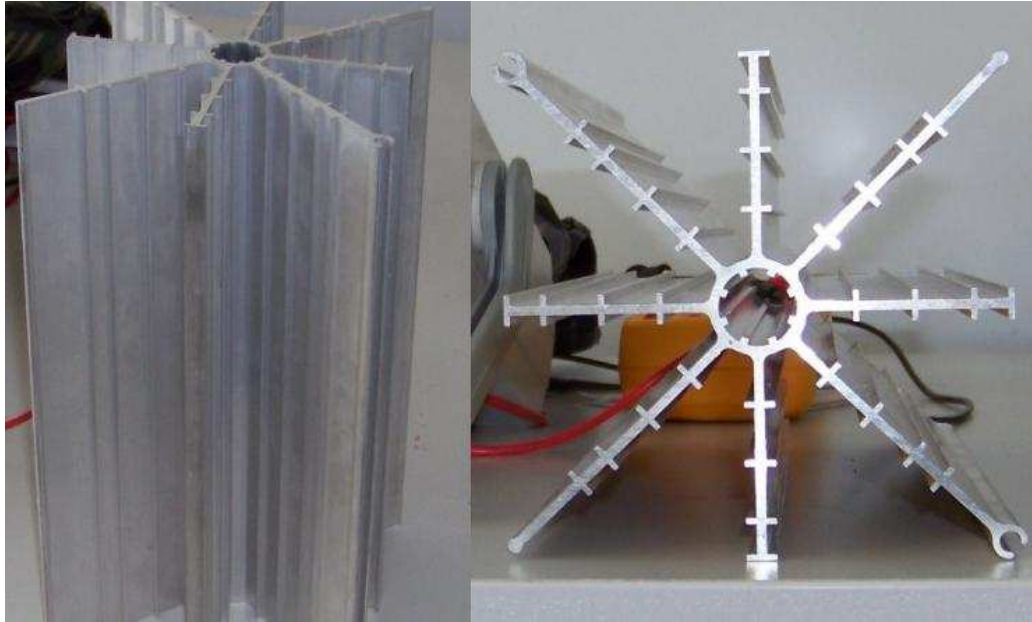
Kriyojenik depolama kaplarında kullanılan malzemelerin kriyojenik sıcaklıklarda elastikiyetlerini kaybetmemesi gerekmektedir. Bu nedenle tankın imalat malzemesinin kriyojenik sıcaklıklarda gösterdiği davranış dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biridir. Çalışma basınçları yüksek olan tankların malzeme mukavemetleri ve malzemelerinin yapısı özellikle önemli hale gelmektedir. Örneğin KGYS sisteminde çalışan kriyojenik tankın maksimum basıncı 38-40 bardır. Bu değer yüksek bir basınç değeridir ve tankın mukavemet düzeyi hakkında fikir vermektedir. Tank basıncı tank üzerinde bulunan bir emniyet ventili ile düzenlenmektedir. Şayet yeterli kullanım olmaz ve tank içindeki kriyojen az da olsa önlenilemeyen ısı kaçakları ile 38-40 bar basınca ulaşırsa emniyet ventili açarak azot gazının bir kısmını tank basıncı yaklaşık 35 bar değerine ulaşıncaya dek tahliye etmektedir. Bu süreç kullanım olmaması durumunda tank içinde hiç sıvı kalmayıncaya kadar devam etmektedir.

2.3.2 Kriyojenik Isı Değişiriciler

Kriyojenik ısı transferi ve kriyojenik ekipman dizaynı bu tez çalışmasına sığdırılmayacak kadar geniş konular olmakla beraber konu gereğince kısaca değinilmeye çalışılmıştır.

Kriyojenik ısı değiştiricilerini normal şartlarda çalışan ısı değiştiricilerinden ayıran en önemli özellik doğal olarak kriyojenik sıcaklıklarla birlikte meydana gelen malzeme özelliklerindeki değişimlerdir. Bahsedilen sorunlardan bazıları şunlardır; 2.11 numaralı denklemde de belirtildiği gibi katıların özgül ısıları kriyojenik sıcaklıklarda mutlak sıcaklığın küpü oranında değişim gösterir. Bu nedenle kriyojenik sıcaklıklarda çalışmak üzere tasarlanan ısı değiştiricilerin yapısal özelliklerinin değişimi göz önünde bulundurulmalıdır [2].

Kritik noktaya yakın bölgede oluşan taşınım: Genelde sıvıların kritik noktaya ulaştıkları basınç değerleri oldukça yüksektir. Fakat kriyojenik akışkanlar çok düşük basınçlarda kritik nokta değerlerine ulaşmaktadırlar. Bu nedenle kriyojenik sistemlerde kritik noktaya yakın bölgelerde taşınımın yanısıra(konveksiyon) ok ani faz değişimleri ile karşılaşmak olasıdır. Bu değişimler beraberinde transport özelliklerindeki değişimleri getirir.



şekil 2.4 : KGYS’de kullanılan ısı değiştiricilerin kanat ve kanal yapısı.

Kriyojenik ısı değiştiricilerin; (zellikle sıvılaştırma tesislerinde) konvansiyonel ısı değiştiricilerden farklı olarak çok daha yüksek verimli olmaları gerekmektedir. Bunun sebebi ısı değişiminin çok düşük sıcaklık farklarında dahi gerçekleşebilir hale getirilmesi zorunluluğudur. Bu nedenle optimal ısı geçişi oluşturmak maksadı ile kriyojenik ısı değiştiricilere özgü kanat ve kanal yapıları kullanılmaktadır. KGYS sisteminde kullanılan ısı değiştiricilerine ait yapı 2.4 numaralı şekilde görülmektedir.

Kriyojenik ısı değiştiricilerinde buzlanma(özellikle gazlaştırma ünitelerinde) karşılaşılan ciddi bir sorundur. Buzlanma sebebi ile ısı değiştirici yüzeyinde yalıtkan özellik gösteren bir buz katmanı meydana gelmektedir. Üzerinde buzlanma oluşmuş bir kriyojenik ısı değiştirici şekil 2.5'te görölmektedir.

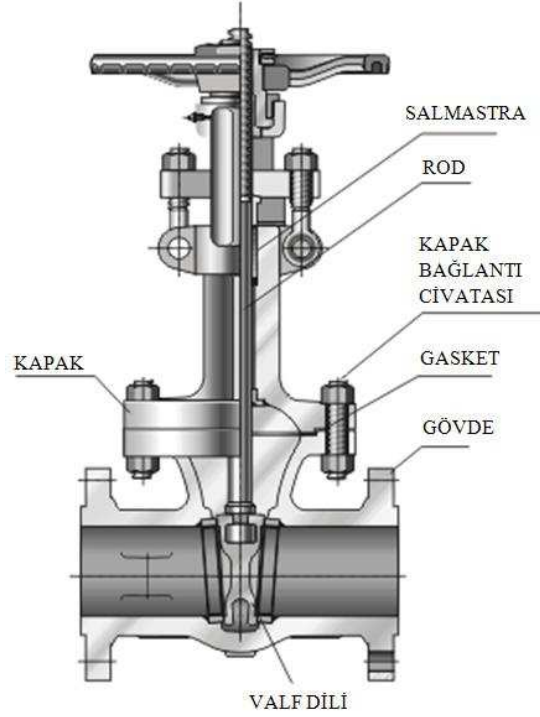


şekil 2.5 : Üzerinde buzlanma meydana gelmiş kriyojenik ısı değiştirici[24].

KGYS'de iki ısı değiştirici bulunmaktadır. Bunlardan ilki tanka akuple regölatör kontrollü basınçlandırıcı, ikincisi ise buharlaştırıcı üniteyi oluşturmaktadır. Regölatör tanktan çekilen sıvı veya gaz miktarına bağlı olarak meydana gelen basınç düşümünü dengelemek için tank üzerindeki ısı değiştiriciye bir miktar kriyojen gitmesine izin vererek buharlaşan sıvı ile tank basıncının tekrar istenilen düzeye gelmesini sağlar. Kullanılan sıvı veya gaz miktarına bağlı olarak tank basıncı bu şekilde kontrol altında tutulur.

2.3.3 Kriyojenik Valfler

Diğer bütün kriyojenik ekipmanlarda olduğu gibi kriyojenik valflerin yapıları ve özellikleri normal sistemlerde kullanılanlardan farklıdır. Valfin komuta edeceği akışkan bir kriyojen olduğundan, faz değişimi istenmeyen durumlarda valfin vakum veya MLI izolasyonlu olması bir gerekliliktir. Ayrıca valfin imalat malzemelerinin, oluşan düşük sıcaklıklarda birbirleri ile olan çalışma yüzeyi klerenslerini muhafaza etmeleri gerekmektedir.



Şekil 2.6 : Kriyojenik bir valfin kısımları.

Kriyojenik valflerin yapıları ve izolasyon performansları çalışacakları sisteme göre değişmektedir. Kriyojenik bir valfin kısımları şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Kriyojenik sistemlerde basıncın kontrol altında tutulması önemli bir husustur. Bu nedenle valfler vasıtası ile birbirinden ayrılan kriyojen nakil hatlarında, meydana gelen ısı kaçaklarına bağlı olarak ortaya çıkan basınç yükselmelerini önlemek için valflerin kapatılması durumunda sistemden ayrı bir hücre haline gelen hatların emniyet ventilleri ile donatılması gerekmektedir. Böylece ısı kaçakları sebebi ile faz değişimi gerçekleşip oluşan kriyojen buharı basınçlanmaya ve bu basınç belli bir seviyenin üstüne çıktığından sistemden tahliyesi sağlanılarak sistemin işletme basıncı limitlerinin dışına çıkması engellenmiş olunur.

2.4 Kriyojenik Isı Yalıtım Malzemeleri

Kriyojenik uygulamalarda kullanılan yalıtım yöntemleri konvansiyonel ısı yalıtım yöntemleri ile kıyaslandığında oldukça yüksek performanslıdır. Bu denli yüksek ısı izolasyonu performansına ihtiyaç duyulmasının asıl sebebi kriyojenlerin çok düşük olan buharlaşma gizli ısılarıdır. Örneğin azotun 1 atmosfer basınçta sahip olduğu buharlaşma gizli ısı 199 kJ/kg iken bu değer su için 2260 kJ/kg olarak karşımıza çıkmaktadır.

Görüldüğü gibi aynı miktarda suyu buharlaştırmak için gereken ısı miktarı azotu buharlaştırmak için gerekenin yaklaşık 11 katıdır. Diğer taraftan, kriyojenlerin sahip olduğu sıcaklık ile ortam sıcaklığı arasında sürekli olarak varolan fark sebebi ile yalıtım ne kadar iyi olursa olsun kriyojene sürekli olarak bir ısı aktarımı söz konusudur. Kriyojenik izolasyonların mümkün olduğu kadar iyi olması kriyojene aktarılan bu ısıyı aynı oranda azaltacaktır.

Kriyojenik uygulamalarda kullanılan çeşitli yalıtım yöntemleri mevcuttur. Bunlar;

- 1) Kapalı olarak genişletilmiş hücrelerden oluşan köpük
- 2) Gaz doldurulmuş toz(granül malzeme) ve lifli malzemeler
- 3) Sadece vakum
- 4) Vakumlanmış toz(granül malzeme) ve lifli malzemeler
- 5) Matlaştırılmış toz(granül malzeme) yalıtım
- 6) Mikro kürecikler
- 7) Çok tabakalı yalıtım(MLI)

2.4.1 Kapalı Olarak Genleştirilmiş Hücrelerden Oluşan Köpük

Burada bahsedilen köpük malzeme genel olarak strafor olarak bilinen, üretimi sırasında kullanılan gazın genişmesi ile birlikte hücresel yapısı gözle görülebilecek düzeye ulaşan malzemelerdir. Kriyojenik uygulamalarda poliüretan, polistiren ve cam köpüğü kullanılan köpük malzemelerden bazılarıdır. Köpüğün termal iletkenliği; köpüğün üretiminde kullanılan gazın türüne, köpüğün yoğunluğuna ve ortalama sıcaklığa bağlıdır [1]. Bu malzemelerin uygulaması, temas ettikleri yüzeyin sıcaklığı gözetilerek yapılmalıdır. Yüksek sıcaklığa sahip yüzeylere temas etmeleri durumunda formlarını çok çabuk bir şekilde kaybederler ve kullanılamaz hale gelirler. Diğer taraftan kriyojenik uygulamalarda kullanılmalarında bazı gereklilikler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar; konveksiyonun önlenmesi için kullanıldıkları alanın vakumlanması veya gaz boşluğunun sadece iletme müsaade edecek kalınlıkta olmasıdır. Isı yalıtımında temel olarak kabul edilebilecek bir kural vardır. Sıcaklık değerine göre uygun malzeme seçmenin gerekliliği göz önünde bulundurulur yalıtım katmanları sayısının mümkün olduğunca artırılması; bu sayede iletim direnci artırılmış olur. Son olarak bu malzemelerin kimyasal tepkimeye girebilecekleri maddelerden mümkün olduğunca arı olmaları kullanımda verimlilik açısından elzemdir. Bazı köpüklerin yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Bazı köpüklerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değeri (sınır sıcaklıkları 300 K ve 77 K) [1].

Köpük	Yoğunluk kg/ m ³	k (mW/ m-K)
Poliüretan	11	53
Polistiren	39	33
Polistiren	46	26
Silica	160	55
Glass	140	35

2.4.2 Gaz Doldurulmuş Toz (granül malzeme) ve Lifli Malzemeler

Bu sınıfa dahil olan yalıtım malzemeleri toz yalıtkanlar ve lifli yapıdaki yalıtkanlar olan; fiberglas, perlit, silika aerojel, kaya yünü ve vermikülit gibi malzemeleridir. Bu malzemelerden en çok kullanılanları fiyatlarının uygun olması ve kolay bulunur olmaları sebebi ile perlit ve vermikülitir.



Şekil 2.7 : Kullanımı yaygın olan toz yalıtım malzemeleri a) Perlit b) Vermikülit.

Şekil 2.7’de perlit ve vermikülit görülmektedir. Perlit ve vermikülit birbirine benzer özellik gösteren kayalardan granüleştirme yolu ile elde edilen malzemelerdir. Granül hale getirilerek kullanılmaları yalıtım ceketini en uygun şekilde doldurabilmelerini sağlamakta diğer taraftan da birim mesafede birbirine temas eden tanecik sayısının artışına bağlı olarak yalıtım sisteminin performansını yükseltmektedir. Kriyojenik ısı yalıtımı yapılırken, konvansiyonel ısı yalıtımından farklı olarak malzemelerin düşük sıcaklıklarda gösterdikleri termodinamik ve transport özellik değişimlerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Çalışma sıcaklıkları çok düşük olmasına rağmen, malzemelerin türlerine göre gösterdikleri ışıma miktarları değiştiğinden kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri önem

kazanmaktadır. Bu türdeki yalıtım malzemelerinin karakteristik özellikleri çizelge 2.8’de verilmektedir.

Çizelge 2.8 : Bazı toz ve lifli malzemelerin yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri(sınır sıcaklıkları 300 K ve 77 K) [1].

Toz ve Lifli Yalıtım Malzemeleri	Yoğunluk kg/ m³	k (mW/ m-K)
Perlit	50	26
Perlit	210	44
Silika Aerojel	80	19
Vermikülit	120	52
Fiberglas	110	25
Kaya Yünü	160	35

2.4.3 Vakumlanmış Toz(granül malzeme) ve Lifli Malzemeler

Perlit ve vermikülit benzeri granül malzemelerin buldukları hacmin vakumlanması ile ısı iletim miktarları düşürülerek yalıtım kabiliyetleri artırılabilir. Bu tür toz malzemelerin gözenekli yapısı içinde hapsolmuş gaz molekülleri küçük boyutta da olsa konveksiyon oluşmasına sebep olur. Bundan dolayı vakumlanan hacimlere doldurulmaları ısı iletiminin konveksiyon haricinde gerçekleşmesini sağlar. Vakum altına alınmış olan bu malzemelerin yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri çizelge 2.9’da verilmektedir.

Çizelge 2.9 : Vakumlanmış toz ve lifli malzemelerin yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri (T; 300 K-77 K P; < 130 mPa) [1].

Toz ve Lifli Yalıtım Malzemeleri	Yoğunluk kg/ m³	k (mW/ m-K)
İnce perlit	180	0,95
Kalın perlit	64	1,90
Silika Aerojel	80	1,61
Fiberglas	50	1,72

2.4.4 Matlaştırılmış Toz(granül malzeme) Yalıtım

Vakumlanmış toz yalıtkan malzemelerde gerçekleşen ısı transferinin büyük bölümü ışınım ile ortaya çıkar. Işınım ile gerçekleşen bu ısı iletimini bertaraf etmenin bir yolu yalıtım malzemesini matlaştırmak veya ışınım olayının gerçekleştiği dalga boyu aralığını geri yansıtacak malzemeler kullanmaktır. Yansıtıcı özellikte olan bu malzemelere örnek olarak; bakır silika aerojel(Santocel), alüminyum silika

aerojel(Santocel) ve silika-karbon gösterilebilir. Bu malzemeler özellikle uzay araçlarıyla alakalı uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Bahsedilen bu malzemelere ait özellikler çizelge 2.10’da verilmektedir.

Çizelge 2.10 : Vakumlanmış mat malzemelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik değeri(T; 300 K-77 K P; < 130 mPa) [1].

Mat Malzemeler	Yoğunluk kg/ m ³	k (mW/ m-K)
Bakır Santocel 50/50	180	0,33
Alüminyum Santocel 40/60	160	0,35
Silika-karbon	80	0,48

2.4.5 Mikro kürecikler

Toz yalıtım malzemelerini matlaştırmak veya toz içine yansıtıcı malzeme karıştırılarak yapılan uygulamalarda yansıtıcı malzemenin belli bölgelerde yoğunlaşması gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu tür problemlerden kurtulmak amacı ile boyutları 15 mikrometre ile 150 mikrometre arasında değişen dış yüzeyi yüksek yansıtma kabiliyetine sahip malzemelerle kaplanmış cam kürecikler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri çizelge 2.11’de verilmektedir.

Çizelge 2.11: Boyutları 15 ile 135 mikro metre arasındaki mikro küreciklere ait yoğunluk ve ısı iletkenlik değeri(sınır sıcaklıkları 300 K ve 77 K artık gaz basıncı 130 mPa’dan az) [1].

Mikro Kürecikler	Yoğunluk kg/ m ³	k (mW/ m-K)
Kaplanmamış	230	0,72
Yarım küre kısmı kaplanmış	130	0,39
Alüminyum kaplanmış	280	0,60

2.4.6 Çok Tabakalı Yalıtım(MLI)

İlk çok tabakalı yalıtım, birbiri üzerine konumlandırılmış yüksek oranda yansıtıcı özellikte alüminyum veya bakır folyo gibi malzemelerden ve bu 30-40 nanometre kalınlıktaki folyo tabakalarının arasını dolduran fiberglas kağıt benzeri malzemelerden meydana gelmekteydi. Fakat bu yapı zamanla oluşan bükülmelerle aradaki fiberglas tabakasında meydana gelen küçük delikler nedeni ile yalıtkanlık özelliğini kısmi de olsa kaybetmektedir. Bu nedenle folyo tabakaları arasına yine aynı incelikte plastik türevli malzemeler veya ipek plakalar yerleştirilip

vakumlanarak mükemmel bir ısı yalıtım elemanı meydana getirilmiştir. MLI yalıtımın kriyojenik uygulamalar bakımından aktif olabilmesi için yaklaşık olarak 11 mPa basıncın altında vakumlanması gerekmektedir. Diğer taraftan yalıtım performansları geliştikçe yalıtım malzemelerinin fiyatları da yükselmektedir. Dolayısı ile MLI kullanarak ısı yalıtım yapmak ciddi maddi yük oluşturmaktadır. Bu nedenle MLI yalıtım yüksek öneme sahip uygulamalarda kullanılmaktadır. Bazı MLI yalıtımların ısı iletkenlikleri çizelge 2.12’de verilmektedir.

Çizelge 2.12 : Bazı MLI’ların ısı iletkenlik değerleri(sınır sıcaklıkları 300 K - 77 K artık gaz basıncı 1,3 mPa) [1].

Çok Tabakalı Yalıtım (MLI)	Tabaka Yoğunluğu tabaka/ cm	k ($\mu W/m-K$)
0,006 mm Al Folyo + 0,015 mmFiberglas kağıt	20	37
0,006 mm Al Folyo + 2 mm örgülü yapay ipek ağ	10	78
0,006 mm Al Folyo + 2 mm örgülü naylon ağ	11	34

2.5 Kriyojenik Güç Sistemleri

Kriyojenik sistemlerin tamamı çok düşük sıcaklıkta sıvılaştırılmış gaz ihtiva eder. Bu sistemler; süper iletkenlik, süper manyetizma, levitasyon(manyetik alanı yasıtarak uçma), ultra hassas görüntüleme sistemleri, çok yüksek hassasiyette yüzey işleme, canlı organizmaların şoklanarak canlı halde muhafaza edilmesi gibi çok çeşitli amaçlarla uygulamaya geçirilmiştir. Kriyojenik güç üretimi oldukça yeni bir kavram olmakla beraber esasında fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak meydana gelen lokal çevresel kirlenmelerin azaltılması için bir çözüm olabilmesi maksadı ile düşünülmüştür. Kriyojenlerin elde edilmeleri esnasında harcanan enerjinin hangi kaynaklardan elde edildiği bu konuda önem kazanmaktadır.

Diğer taraftan; sıvılaştırılmış azot, hidrojen, oksijen, doğalgaz, LPG(sıvılaştırılmış petrol gazı) ve sayılabilecek diğer kriyojenik akışkanlar sıcaklıklarının düşük olması sebebi ile hem çok yüksek basınçları herhangi bir ek ekipman olmaksızın meydana getirmek ve gerekse çok düşük sıcaklıklı çalışma akışkanları elde etmeye olanak vermeleri sebebiyle güç üretimine olanak vermektedirler. Bunu daha basit olarak açıklamak gerekirse kriyojenleri gazlaştırmak gerektiğinde, çevreden kriyojenlere doğru bir ısı aktarımı meydana gelir. Bu ısı akışı vasıtası ile ısınarak basıncı ve sıcaklığı nispi oranda artan akışkandan güç üretmek mümkün hale gelir.

Fakat üretilebilecek güç miktarı, bu gazların belli bir basınç değerinden sonra sıkıştırılabilirlik özelliklerinin artması ile hemen hemen sabit bir hale gelmektedir. Bu basınç değeri gazın cinsine göre değişmektedir. Yükselen basınç izentropik genişleme durumunda daha düşük sıcaklıklara genişmeyi, izotermal genişlemede ise nispeten daha yüksek güç üretilebilmesine olanak vermektedir. Kriyojenik güç üretimi konusunda günümüze değin yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların çoğu önceki paragrafta anlatılan enerji akışına bağlı entalpi üretiminin kullanılması temeline dayanmaktadır. Bu çalışmalara ait örneklerden bazıları ise şunlardır. Çin Bilimler Akademisi'nden(Beijing) Na Zhang ve Pensilvanya Üniversitesi'nden Noam Lior 17 Ağustos 2007'de sıvı hidrojen ile kriyojenik ekserjiden faydalanmayı sağlayan değişik bir Brayton çevrimi uygulaması ortaya koymuşlardır [3]. Bu uygulama prensip olarak; sıvı hidrojen ile Brayton çevrimine göre çalışan bir türbinin giriş havasının soğutulması ve ardından giriş havasından bir miktar enerji absorbe ederek entalpisi artan hidrojenin yanma ile oluşan egzoz gazları ile buharlaştırılarak yakılması ilkesine dayanmaktadır. Çalışma akışkanının soğutulması ile kompresör yükü doğal olarak azalmakta ve böylece türbinin ürettiği faydalı iş miktarı artmaktadır. Diğer bir kriyojenik güç üretim uygulaması ise Silesian Teknoloji Üniversitesinden Jan Szargut ve Ireneusz Szczygiel tarafından yapılan; kriyojenik olarak depolanan ve taşınan sıvılaştırılmış doğalgazın sahip olduğu ekserjiyi kullanarak elektrik üretimi isimli çalışmadır [4]. Bu çalışmada sıvılaştırılmış doğal gazın sahip olduğu düşük sıcaklıktan kaynaklanan ekserji kullanılarak elektrik üretiminin ekonomik incelemesi ve tek ve çift kademeli sistemler kullanılarak elde edilen verim araştırılmıştır. Başka bir kriyojenik güç üretimi uygulaması ise Abe Hertzberg yönetiminde Washington Üniversitesinde yapılan azot tahrikli otomobil çalışmasıdır[25]. Bu çalışmada atmosferik çevrim ile çalışan hava motoru ile sevk edilen bir otomobil üretilmiş ve bunun piyasada bulunan diğer otomobillerle rekabet edebilirliği araştırılmıştır. Yine aynı üniversitede sıvı azotla tahrik edilen otomobiller için yüksek verimli enerji dönüşüm sistemleri isimli bir çalışma C. Knowlen, A.T. Mattick, A.P. Bruckner ve A. Hertzberg tarafından yapılmıştır[5]. Çalışmada kapalı Rankine çevrimi ile çalışan bir basınçlı azot motorunun veriminin daha yüksek olacağı konusunda detaylar verilmektedir. Yapılan başka bir çalışma ise kuzey Teksas Üniversitesinden Dr. Carlos Ordonez, Dr. Mitty Plummer ve Dr. Rick Reidy tarafından yapılan, sıvı azot kullanılarak çalıştırılan otomobil uygulamasıdır [26]. Bu uygulama çerçevesinde; sıvı azotu, atmosferden aldığı ısı vasıtası ile buharlaştırıp

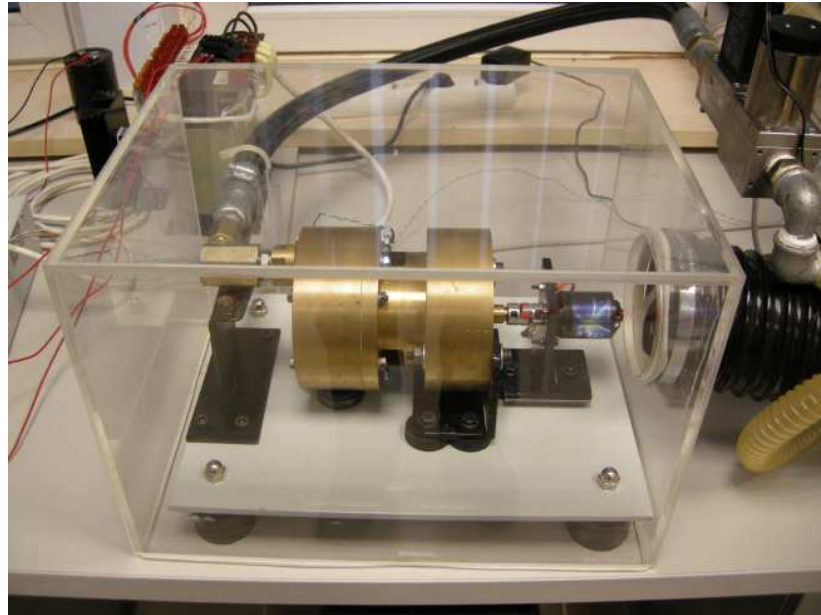
basınçlandırarak bir hava motorunu sürmek sureti ile iş üreten bir otomobil üretilmiştir. Çalışmanın temel amacı, şehirlerde kullanılan otomobillerin havayı kirletmeyecek şekilde çalışır hale getirilmesidir. C. Ordonez tarafından 1999 senesinde sözü edilen bu araçta kullanılacak kapalı Brayton çevrimi ile çalışan bir gaz motoru hakkında bir çalışma yayınlanmıştır [6]. C.A. Ordonez bu çalışmada kapalı Brayton çevrimine göre çalışan sıvı azot tahrikli otomobilin eriminin daha yüksek olacağını ortaya koymuştur. Yine C.A. Ordonez ve M.C. Plummer, 1996 yılında soğuk ısı depolama ve enerji depolama uygulamaları için kriyojenik motorlar isimli teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir[7]. Yaptıkları bu çalışmada depolanan kriyojenlerin kendi ağırlıklarına göre oldukça yüksek egzerji kapasitesine sahip olduklarını anlatmaktadırlar. Kriyojenik güç üretimi ile doğrudan alakalı olmamakla beraber, bu tezinde asıl konularından birini oluşturan kriyojenik güç yedekleme ile ilgili olarak yapılmış olan bir çalışmada kriyojenik akışkanların yüksek basınç altında kayıpsız olarak depolanması üzerine, Şangay Jiao Tong Üniversitesi, Kriyojenik Mühendislik ve Soğutma Enstitüsü'nden Zhaoci Li, Lie Xu, Heng Sun, Youming Xiao ve Jie Zhang tarafından yapılan çalışmadır[8]. Yapılan bu çalışmada göreceli olarak yüksek basınçlarda depolanan kriyojenlerin kayıpsız olarak depolanabileceği fakat bu uygulama yapılırken yüksek basınca bağlı olarak artan malzeme kalınlıkları nedeni ile muhafaza ekipmanlarının ısı sığalarının büyümesi nedeni ile ilk doldurma sırasında ciddi miktarda kriyojen kayıplarının söz konusu olduğundan bahsedilmektedir. Kriyojenik güç üretimi üzerinde yapılan çalışmaların sayısı ve geçmişi fazla değildir. Bu nedenle bu konuda yapılabilecek yeni uygulamalar mevcuttur.

2.6 Tesla Türbini

Bu tezin esas konusunu oluşturan Tesla Türbini(TT), 1913 yılında, daha çok elektrik konusundaki çalışmaları ile tanınan Nikola Tesla tarafından bulunmuştur[10]. Nikola Tesla'nın yüksek frekanslı elektrik üretme çalışmaları ve bunu sağlayacak yüksek hızlı birincil tahrikçilere olan ihtiyacı onu böyle bir makine arayışına itmiştir. Tesla türbininin en büyük özelliği; diğer türbinlerden farklı olarak kanatsız oluşudur. Bu türbin; rotor verimine, rotorun dış çapına ve çalışma akışkanının nozuldan çıkış hızına bağlı olarak çok yüksek açısal hızlara ulaşabilmektedir. Bahsedilen bu hız 120000 rpm değerlerine hatta üzerine çıkabilmektedir[9]. Bu denli yüksek hızlı bir makinenin çalışması bir takım sorunları da beraberinde getirmektedir.

Yataklama hassasiyeti, yataklamanın oluşturduğu sürtünme direnci, rotoru oluşturan disklerin, yapıldıkları malzemenin akma mukavemetine bağlı olarak belli bir limit hız noktasından sonra çaplarının büyümesi bu sorunlardan bazılarıdır.

Nikola Tesla'nın, ortaya koyduğu bu buluşun ilk prototipini yaparken karşılaştığı en büyük sorun yüksek hızlarda çalışabilecek özellikte disk malzemesi bulamaması olmuştur. Bu nedenle hedeflediği kadar yüksek hızlara ulaşması mümkün olmamıştır. Bu makinenin endüstriyel gelişim süreci içerisinde kendisine yer edinemeyişinin en büyük sebeplerinden biri budur ve uzun yıllar böyle devam etmiştir. Malzeme biliminin gelişmesi ile beraber daha yüksek mukavemetli elemanların kullanımının mümkün hale gelmesiyle birlikte daha yüksek hızlarda çalışan türbinler yapılmaya başlanmış ve bu konuda yapılan araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. TT'nin konvansiyonel türbinlere göre bazı avantajları vardır. Rotoru oluşturan disklerde akış yönü sebebi ile aşınma ve kavitasyon sorunu konvansiyonel türbinlere nazaran hemen hemen hiç yoktur. Rotor yapısı sebebi ile çapsal balans sağlamak konvansiyonel türbinlere nazaran daha kolaydır. Rotor, yapısı sebebi ile konvansiyonel türbin rotorlarına kıyasla oldukça hafiftir ve bu yataklardaki baskıyı nispeten azaltmaktadır. Bu çalışma kapsamında deneysel amaçlı üretilen TT ve TT miline akuple yüksek frekanslı alternatör şekil 2.8'de görülmektedir.

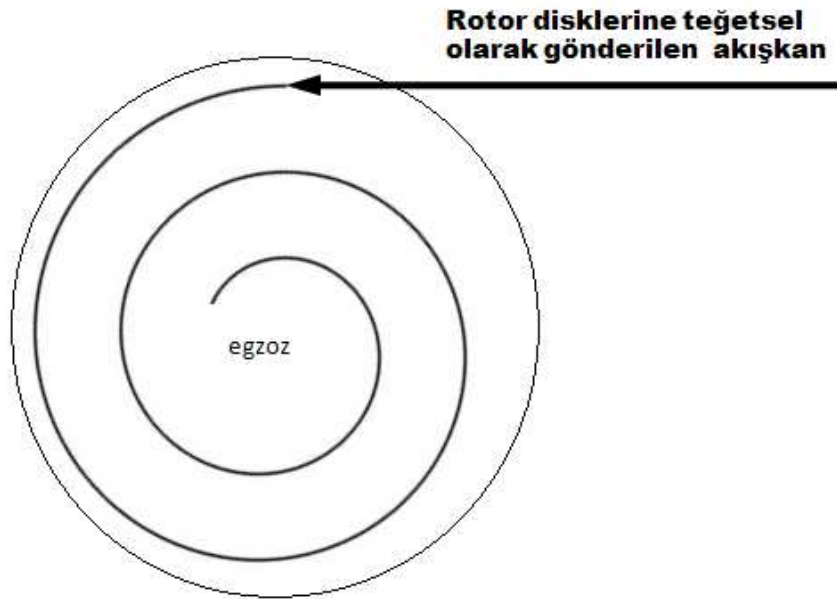


Şekil 2.8 : Üretilen TT ve TT miline akuple yüksek frekanslı alternatör.

Geçmişte, karşılaşılan bazı güçlüklerin aşılması mümkün olmamış ve bu nedenle TT'nin verim değerleri icadını takip eden ilk dönemlerde çok fazla arttırılamamıştır. Diğer taraftan; yapılan çalışmalar TT'nin verim değerinin %80'ler düzeyine çıkarılabileceğini ve yukarıda sayılan özellikler sebebi ile TT'nin gelecekte kullanılabileceğini öngörmektedir[9].

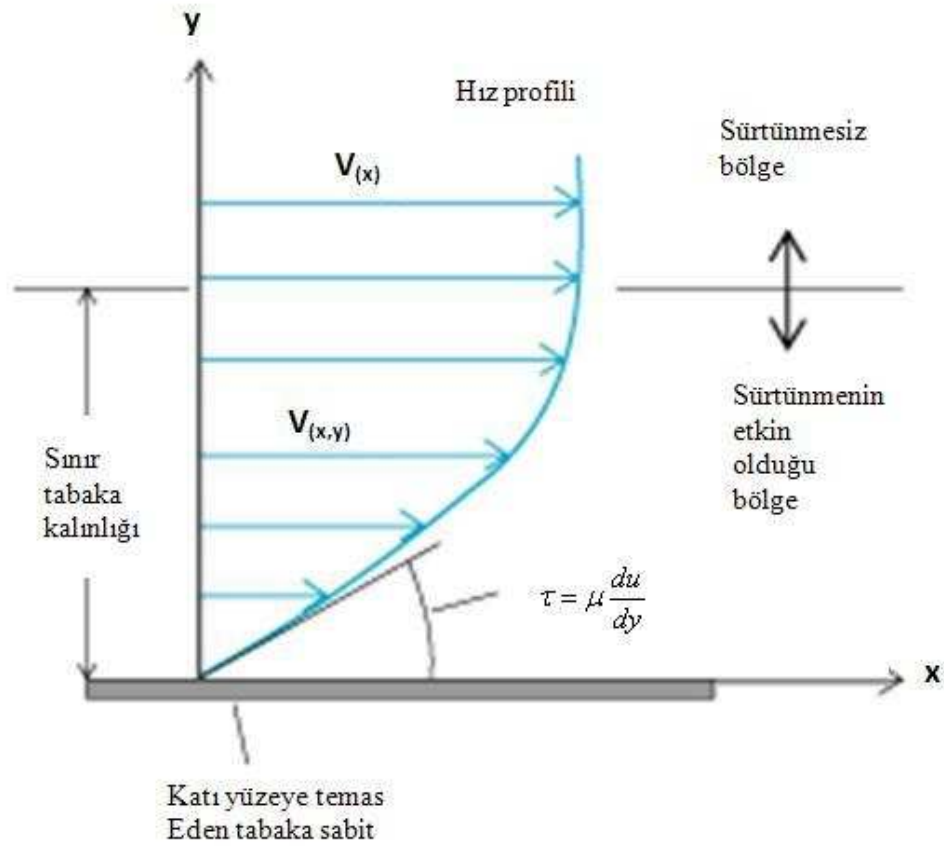
2.6.1 Çalışma Prensibi

Nikola Tesla tarafından icat edilen TT, icadından bu yana geride kalan yaklaşık 100 senelik dönem içerisinde çok çeşitli isimlerle adlandırılmıştır. Sınır tabaka türbini, sürtünme türbini, kanatsız türbin, diskli türbin bu isimlerden bazılarıdır. Bu isimlerden de anlaşılabilir gibi türbinde hareket yani iş; birbirine çok yakın aralıklarla dizilmiş disklerden oluşan bir rotora, bir nozul vasıtası ile teğetsel olarak gönderilen yüksek hızlı akışkanın, diskler arasından geçerken karşılaştığı akış direncine(viskoz sürtünme) bağlı olarak disklere enerji aktarması ile üretilmektedir. Teğetsel olarak gönderilen akışkan ve yüksek açısal hızlarda akışkanın yaklaşık olarak takip etmesi öngörülen akış yolu şekil 2.9'da gösterilmektedir. Bu şekilde verilen spiralin bu ölçekte burğu yapabilmesi; rotor disklerinin çapı, rotorun dönüş hızı ve diskler arası mesafe ile doğrudan bağlantılı olarak değişmektedir. 2.9 numaralı şekilde görülen spiralin, şeklin açıklayıcı olabilmesi amacı ile çok burgulu bir şekilde gösterilmesi özellikle tercih edilmiştir.



Şekil 2.9 : Yüksek açısal hızda oluşması öngörülen akış yolunun basit gösterimi.

Burada sözkonusu olan enerji transferi, sınır tabaka kavramına göre gerçekleşmektedir. Sınır tabaka kavramına göre; örneğin katı ve düz bir yüzey üzerinde meydana gelen bir sıvı akışında, akışkanın tabakalar halinde aktığı ve bu tabakaların hızının katı yüzeye yaklaştıkça azaldığı ve katı yüzeye temas eden ilk tabakanın yüzeye yapıştığı ve sabit olduğu kabul edilir. Bunun anlamı sınırda bulunan tabakanın cismi veya yüzeyi kendisi ile beraber harekete (sürüklenmeye) zorlayacağıdır. İşte Tesla türbininin aynı zamanda sınır tabaka türbini olarak adlandırılmasının sebebi budur. Şekil 2.10'da sınır tabaka kavramı görsel olarak anlatılmaktadır.



Şekil 2.10 : Katı yüzeyde akış halinde sınır tabaka oluşumu.

Şekilde de gösterildiği gibi akışkanın temas halinde olduğu yüzeyden itibaren belli bir uzaklığa, yani serbest akış bölgesine kadar akış hızı artmaktadır. Tersine bir ifade ile serbest akış hızı belirli bir noktadan itibaren azalmaya başlayarak temas yüzeyinde sıfır olmaktadır. Temas yüzeyinden, serbest akış hızının ilk görüldüğü noktaya kadar olan mesafeye sınır tabaka kalınlığı adı verilir.

TT’de rotor diskleri arasındaki boşluklar, akışkan mleküllerinin birbirlerine göre hemen hemen sabit konumda olduğu serbest akış bölgesinin oluşmamasını sağlamak için çok küçük olmak zorundadır. Diskler arasındaki boşlukların küçük olması, akışkanın bu boşluklardan geçmeye çalışırken sanki kendi yolu üzerinde bir engel varmış gibi davranmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında deneysel amaçlı üretilen TT’nin rotoru Şekil 2.11’de görölmektedir.



Şekil 2.11 : TT’nin rotoru ve birbirine 1.5 mm aralıkla dizilmiş rotor diskleri.

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi diskler arasındaki boşluklar oldukça küçük olmakla beraber istenilen boyutta değildir. Akışkandan disklere aktarılan enerjinin artırılabilmesi için bu boşluk değerlerinin birkaç sınır tabaka kalınlığı kadar olması gerekmektedir. Sınır tabaka kalınlığı ve dolayısı ile rotor disk boşluklarının boyutu ile ilgili daha detaylı bilgi temel bağıntılar kısmında verilecektir.

2.6.2 Tesla Türbini ile İlgili Temel Bağlılıklar

TT'nin verimi ve üretebileceği gücü etkileyen dört temel unsurdan bahsedilebilir. Bunlardan ilki çalışma akışkanının diskler enerji aktarmasını sağlayan, diskler arasındaki boşluk mesafesi, ikincisi akışkanın basıncının düşüp hız kazandığı eleman olan nozulun verimliliği, üçüncüsü rotor disk çapı, sonuncusu ise rotorun açılma hızıdır. Bunların haricinde yapısal dayanımla alakalı bazı ifadeler de bu bölümde incelenecektir.

Türbülanslı akışların malzemeler üzerinde meydana getirdiği istenmeyen etkiler (şok dalgaları, titreşim oluşumuna bağlı yorulma sebebi servis ömrü kısalması vb.) sebebi ile türbin diskleri arasında gerçekleşen akışın laminar olması gerekmektedir. Bir akışın laminar veya türbülanslı olduğuna Reynolds sayısının aldığı değerlere göre karar verilebilir. Borular ve benzeri kanallar içinde gerçekleşen akışlar için Reynolds sayısının 2300'den küçük olduğu durumlar laminar, 4000'den büyük olduğu durumlar ise akışın türbülanslı olduğunu gösterir. 2300 ile 4000 arasındaki bölge ise geçiş bölgesi olup her iki türde akışın birlikte görülebileceği bölgedir. Laminar akış sağlanabilmesi TT rotor verimini etkileyen önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle diskler arasında meydana gelen akışın laminar olması gerekli şartlar sağlanmalıdır.

TT rotor diskleri arasındaki akışın oluşturduğu döngüsel hareket, borularda meydana gelen akışlardan yola çıkılarak açıklanabilir. Sabit konumlu bir boru içinde bir akışkan hareket ederken, borunun iç cidarı ile arasındaki sürtünme ve akış tabakaları arasında akışkan viskozitesinden dolayı meydana gelen sürtünme sebebi ile bir miktar enerji kaybı ve dolayısı ile basınç düşümü ile karşılaşır. Akışkan kaybettiği enerji miktarına bağlı olarak boruya bir itme kuvveti uygulamaktadır. Boru sabit olduğundan bu kuvvet herhangi bir faydalı iş yapamaz ve sürtünme nedeni ile meydana gelen basınç düşümü ısıya dönüşerek faydalanılabılır olmaktan çıkar.

Şayet akışın meydana geldiği boru sabit olmazsa akışkan boruyu kendisi ile beraber hareket ettirmeye başlayacak ve dengeleyen karşı bir kuvvet olmadığı sürece akışkan ile aynı hıza ulaşana dek boru veya benzer temas yüzeyli cisim hızlanmaya devam edecektir. Bu akışın gerçekleştiği kanalın TT rotorunu oluşturan disklerin arasında kalan bölge olduğunu düşündüğümüzde disklerin hareketini sağlayan fiziksel durumun borularda gerçekleşen akış kurallarına uyduğu anlaşılır [12].

Borularda gerçekleşen akışlara bağlı olarak meydana gelen enerji kayıpları Darcy-Wiesbach eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir ve eşitlikler TT rotor disklerindeki akış

için de geçerlidir[11]. Aşağıda 2.12 numaralı eşitlikte gösterilen f_{lam} Darcy sürtünme faktörünü ifade etmektedir ve basınç düşümünün hesaplanılmasında kullanılır.

$$f_{lam} = \frac{64}{Re_{D_h}} = \frac{64\mu}{\rho V D_h} \quad (2.12)$$

2.12 numaralı eşitlikte μ çalışma akışkanının dinamik viskozitesini, ρ akışkan yoğunluğunu, V akışkanın disklere göre bağlı hızını, D_h ise hidrolik çapı ifade etmektedir. 2.12 ifadesinde belirtilen hidrolik çap, 2.13 numaralı eşitlikte belirtildiği gibi akışa dik kesit alanının(A) 4 katının ıslak çevreye bölünmesi ile bulunur.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.13)$$

TT için yapılan hesaplamalarda efektif çap olarak tanımlanan uzunluğun kullanılması daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır[11]. Efektif çap, hidrolik çapın 3 te 2 sine eşittir.

$$D_{eff} = \frac{2}{3} D_h \quad (2.14)$$

Rotor disklerinin birbirlerine olan uzaklığını a ile göstererek, 2.15 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde bir hidrolik çap tanımlaması yapılabilir[11].

$$D_h = \frac{4\pi D_{ext} a}{2(\pi D_{ext} + a)} \quad (2.15)$$

2.15 numaralı eşitlikte D_{ext} rotoru oluşturan disklerin dış çapını ifade etmektedir. Şayet a değeri disklerin dış çap değerinden ihmal edilebilecek derecede küçükse bu durumda hidrolik çap, a 'nın 2 katına eşit olmaktadır.

$$D_h = 2a \quad (2.16)$$

Bu durumda efektif çap a 'nın 4/3 katına eşit olur.

$$D_{eff} = \frac{4}{3} a \quad (2.17)$$

Yukarıda belirtilenlere dayanarak, TT rotorunda meydana gelen akış için Reynolds sayısı 2.18 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde ifade edilebilir. Reynolds sayısı bu şekilde bulunduktan sonra TT'nin hangi hız ve disk boşluğu değerlerinde laminar akış bölgesinde çalışacağına karar verilebilir. Fakat V değeri çalışma akışkanının rotor disklerine göre bağlı hızını ifade ettiğinden rotorun dönüş hızında meydana gelen değişimler Reynolds sayısında değişmesi anlamına gelmektedir. Rotorun açılma hızındaki artışla beraber bağlı hızda azalacağından akışın Reynolds sayısı da azalacaktır. Buradan hareketle TT'nin kalkışta yüksek nozul çıkış hızlarına ve disk aralıklarına da bağlı olarak yüksek Reynolds sayılı bir akış bölgesinden daha düşük Reynolds sayılı bir akış bölgesine geçeceği öngörülebilir. Bu durum; kalkış anından

çalışma hızına ulaşıncaya dek geçen süre boyunca türbülanslı akışa bağlı olarak gürültü, aşırı titreşim veya yapısal sorunlar yaşanmaması için türbinin ani şekilde değil kademeli olarak hızlandırılmasının daha uygun olacağını göstermektedir.

$$Re_{D_{eff}} = \frac{4 \rho V a}{3 \mu} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki eşitliklerden faydalanılarak hidrolik çap ve Darcy sürtünme faktörü bulunduktan sonra, borularda ki akışlarda meydana gelen sürtünme kayıplarını bulmakta kullanılan Darcy-Weisbach eşitliği TT rotoruna aktarılan enerjinin yaklaşık olarak bulunmasında da kullanılabilir. Burada bulunacak değer Paskal(N/m²) cinsinden basınç düşümünü verir ve hacimsel debi ile bu değer çarpıldığında akışkanın girişte sahip olduğu enerjinin ne kadarının rotora aktarıldığı yani türbinin ürettiği iş Watt cinsinden bulunur.

$$\begin{aligned} \Delta P &= f \frac{L}{D_{eff}} \frac{\rho V^2}{2} = \frac{64 \mu L}{\rho V D_{eff}^2} \frac{\rho V^2}{2} \\ &= \frac{576 \mu L V}{8 D_h^2} = \frac{18 \mu L V}{a^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.19 numaralı eşitlikte f, 2.12 numaralı eşitlikte belirtilen f_{lam} olarak belirtilen laminar akış için Darcy sürtünme faktörüdür. L akışkanın rotordan geçerken kat ettiği mesafeyi(kabaca çap uzunluğu kadar alınabilir), D_{eff} efektif hidrolik çap, ρ akışkan yoğunluğu ve V akışkanın disklere göre bağlı hızını göstermektedir. 2.19 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde basınç düşümü hesaplandıktan sonra bu değer hacimsel debi ile çarpılması sonucu(eşitlik 2.20) bir disk aralığı tarafından rotora aktarılan enerji bulunur. Çalışma akışkanının iç sürtünmesi ile kaybolan enerji ihmal edildiğinde bu değer rotora aktarılan enerjiye eşittir.

$$W = \Delta P * \dot{V} * n \quad (2.20)$$

Yukarıda 2.19 numaralı eşitlikten faydalanılarak hesaplanan değer sadece bir disk aralığı için basınç düşümünü verir. Rotor disk paketi üzerinde ise toplam disk sayısına bağlı olarak değişen miktarda disk aralığı bulunmaktadır. Önceden belirtildiği şekilde bulunan basınç düşümüne ait bu değer hacimsel debi ile çarpılması sonucu, rotor disk paketi üzerinde yan yana çalışan iki diskin oluşturduğu bir aralık için üretilen güç bulunmuş olur. Elde edilen toplam gücün bulunabilmesi için oluşan toplam basınç düşümüne ihtiyaç vardır. Buradan hareketle, üretilen toplam gücün bulunabilmesi için ortaya çıkan bu değer toplam aralık sayısı ile çarpılması gerekir. 2.20 numaralı eşitlikte n toplam aralık sayısını gösterir. Rotor üzerinde ki toplam aralık sayısı disk sayısının bir eksigidir fakat mahfaza ve nozul

yapısına göre rotorun ilk ve son disklerinin yüzeylerinin de iki disk yüzeyi yani aralık oluşturduğu kabul edilerek n toplam aralık sayısı yani toplam disk sayısı olarak kullanılır.

2.6.2.1 Sınır Tabaka Kalınlığı

Şekil 2.8'den de görüldüğü gibi sınır tabaka kalınlığı olarak belirtilen uzunluk akışkanın temas ettiği yani sınır tabaka hızının sıfır olduğu nokta ile serbest akış hızına ulaştığı nokta arasındaki mesafedir ve δ simgesi ile gösterilmektedir. Birbirine paralel diskler arasında akan akışkanın, disklere enerji aktarımını optimal şekilde gerçekleştirmesi için diskler arası mesafenin birkaç δ kadar olması gerekmektedir. Bu mesafe akışkanın bağlı hızına bağlı olarak değişeceğinden, yapısal ve tork talebi kısıtlarına bağlı olarak türbinin optimal çalışma hızı belirlenmeli ve buna uygun disk aralığı sınır tabaka boyu hesaplanarak bulunmalıdır.

$$\frac{\delta}{a} = \frac{4,910}{\sqrt{Re_a}} \Rightarrow \frac{\delta}{a} = \frac{4,910}{\sqrt{\frac{\rho V a}{\mu}}} \Rightarrow \delta \approx 5 \sqrt{\frac{\nu a}{V}} \quad (2.21)$$

2.21 numaralı eşitlikte a diskler arası mesafeyi, ρ akışkan yoğunluğunu, V akışkanın diskler arasında akarken, disklere göre bağlı hızını, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ν akışkanın kinematik viskozitesini göstermektedir. Örneğin, azot gazı için dinamik viskoziteyi $17,81 \times 10^{-6}$ (Pa.s), yoğunluğu $1,251 \text{ kg/m}^3$, diskler arası mesafeyi $1,5 \times 10^{-3}$ m ve akışkanın disklere göre bağlı hızını da 250 m/s kabul edersek, bu durumda sınır tabaka kalınlığı $46,2 \times 10^{-6}$ m yani 46.2 mikron olarak karşımıza çıkmaktadır. Rotorun artan açısal hızına bağlı olarak çalışma akışkanının bağlı hız değeri azalacağı için sınır tabaka kalınlığı artacaktır.

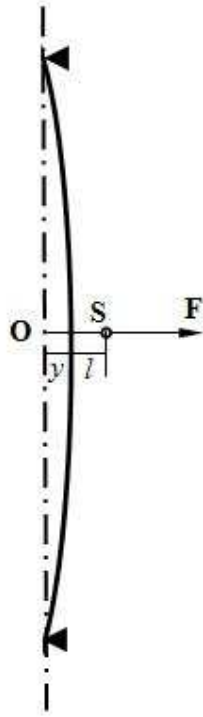
2.6.2.2 Rotor için Kritik Devir Hızı

Kendi eksenini etrafında dönen parçaların ağırlık merkezlerinin, dönme eksenini üzerinde olması güvenli bir işletme açısından hayati derecede öneme sahiptir. Bu nedenle kritik devir hızı; yüksek hızlarda dönen rotorlar ve nispeten düşük hızda fakat kütlesi büyük olan parçalar için oldukça önemli bir role sahiptir. Rotorun ağırlık merkezi çok az da olsa dönme ekseninden kaçık olduğu takdirde bu kaçıklığın dönme sırasında oluşturduğu merkezkaç kuvvet şaftı eğici yönde bir baskı uygular. Oluşan bu baskı kuvveti yatakların hasar görmesine, aşırı titreşim oluşmasına ve

şaftın elastik mukavemet gösterebileceği limitlerin dışına çıkması durumunda ise şaftın kalıcı olarak eğilmesine ve hatta kırılmasına sebep olur. Kritik devirde şaftın üzerine etkiyen kuvvetin de bir ifadesi olan bu sehim miktarı teorik olarak sonsuzdur. Şaft imalatında kullanılan malzemelerin kütleli homojenliği yüksek olmak zorundadır. Dolayısı ile, ağırlık merkezleri kütleli homojenliğin gereği olarak dönme eksenine geleceğinden, kendi dış yüzeylerinin ve içinde çalıştıkları yatakların ovallik derecesi ihmal edilebilir düzeydeyse ağırlıksız kabul edilebilirler. Başka bir deyişle, ağırlık merkezi yataklama eksenine ile çakışan dönel bir parçanın, yataklara kendi ağırlığı haricinde bir kuvvet etki etmesine neden olmayacağı kabul edilerek şaftın ağırlığına bağlı olarak meydana gelen baskı ihmal edilebilir. Fakat şaftın üzerine eklenen diğer parçalarla birlikte son olarak ortaya çıkan rotorun paketinin ağırlık merkezi dönme ekseninden kaçık olabilir. Günümüzde dinamik balans sistemleri gelişmiş olmasına karşın türbin rotoru gibi oldukça yüksek açısal hızlara ulaşan yapıların çok hassas balanslanamama ve çalışma hızlarının uygun olmamasına bağlı olarak kritik devir hızı sorunları yaşaması muhtemeldir. 2.12 numaralı şekilde ağırlık merkezi şaft ekseninden l kadar kaçık olan rotora etkiyen kuvvet (F) ve oluşan sehim (y) basit şekilde gösterilmiştir. Burada önemli olan şaftın gösterilen şekildeki formu alması değil yatakların tepki kuvveti olmaması durumunda bu şekle gelmesidir. Yani baskı şafta değil aslında yataklara binmektedir. Bu durum ilk olarak şaft ve yataklar arasında yağlamanın zorlaşmasına bağlı olarak sürtünmenin artmasına ve dolayısı ile sürtünmeye bağlı aşınmaların artmasına sebep olmaktadır. Bunun diğer bir anlamı söz konusu parçaların öngörülenden daha kısa bir sürede kullanım ömürlerini tüketiceğidir.

2.12 numaralı şekilde iki ucundan yataklanmış bir rotorun üzerine etkiyen merkezkaç kuvvete bağlı olarak yataklama haricinde alacağı form gösterilmeye çalışılmıştır. Buradan hareketle ağırlıksız kabul edilen bir şaftın üzerine yapılan disk eklemeleri ile ağırlık merkezi merkez eksenden l mesafesi kadar kaçık hale gelmişse, bu durum rotorun kütesine ve açısal hızına bağlı olarak şaft üzerinde y uzunluğu kadar bir sehim yaratır. Daha doğrusu bu sehimi yaratma yönünde baskı uygular. Disklerden oluşan tekerleğin kütesi m , açısal hız ω alınarak şaftın dönüşü esnasında meydana gelen F merkezkaç kuvveti aşağıda 2.21 numaralı eşitlikte belirtildiği şekilde bulunur.

$$F = m(y+l)\omega^2 \quad (2.21)$$



Şekil 2.12 : Ağırlık merkezi dönme ekseninden kaçık hale gelen rotorda dönme esnasında oluşan sehmin basit gösterimi.

Oluşan bu merkezkaç kuvvet, şaftın elastik mukavemet bölgesi içinde kalmak kaydı ile şaftın oluşturduğu F_t tepki kuvveti ile dengelenir. Bu durumda şaftta meydana gelen birim eğilme başına ortaya çıkan toplam kuvvet F_u (Newton/cm) cinsinden 2.22 numaralı eşitlikte gösterildiği biçimde bulunur.

$$F_u = \frac{F_t}{y} \text{ ve } F_t = F$$

$$\Rightarrow F_u \cdot y = m (y+l) \omega^2 \quad (2.22)$$

$$F_u = \frac{m (y+l) \omega^2}{y}$$

Şaftın yaptığı deplasmanın uzunluğu y 2.22 numaralı eşitlikten faydalanılarak ifade edilecek olursa, 2.23 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde bulunur.

$$F_u y = m (y+l) \omega^2$$

$$F_u y - m y \omega^2 = m l \omega^2 \Rightarrow y = \frac{m l \omega^2}{F_u - m \omega^2} \quad (2.23)$$

Yukarıda ki eşitlikte açık şekilde görüldüğü gibi $F_u = m \omega^2$ olduğu durum için şaftta meydana gelen sehmin teorik olarak sonsuzdur. Bu durum aslında malzeme öz frekansı ile çalışma frekansının çakışması durumuna benzer. İşte açılma hızının bu eşitlik durumu için çekilmesi ile kritik açılma hızı bulunmuş olur (bkz. eş. 2.24).

$$\begin{aligned}
F_u &= m \omega^2 \\
\omega &= \sqrt{\frac{F_u}{m}} = \frac{2\pi n_k}{60} = \sqrt{\frac{F_u}{m}} \\
n_k &= \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{F_u}{m}}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Rotor balansı ve kritik devir tayini aslında oldukça karmaşık bir iştir. Rotorşaftta meydana gelmesi muhtemel sehim, şaftın yatak boşlukları, mesnetlendiği noktalar ve yükleme durumuna göre değişkenlik gösterir. Deneysel amaçlı üretilen TT'nin maksimum rotor çapı 45 mm'dir. Bu değer yataklama yüzeylerini üzerinde bulunduran mil bölümünde 16 mm'ye kadar inmektedir. Rotorun kompleks bir yapısı olmasına karşın 2.11 numaralı şekilden de anlaşılacağı gibi rotora eklenen diskler havada asılı vaziyette kalacak şekilde konulanmıştır, disk malzemesi alüminyum tabanlıdır ve şaftın eksen-yüzey paralellik toleransları(max.%10) imalat sırasında mümkün olduğu kadar düşük tutularak şaftın ağırlık merkezi yeterli bir hassasiyetle eksen üzerinde tutulmuştur. Kritik devir durumu ileride yapılması düşünülen daha büyük disk çapına sahip türbinler için daha detaylı şekilde ele alınacaktır.

2.6.2.3 Rotor Disklerinde Oluşan Yapısal Gerilmeler

Dönen her cisimde olduğu gibi TT rotor disklerinde de yapısal gerilmeler meydana gelir. Bu nedenle, türbin disklerinin yapımında, türbin için karar verilen çalışma hızında meydana gelecek olan atalet kuvvetlerini dengeleyecek yapısal mukavemete sahip malzeme kullanılması türbinin güvenli çalışması için gerekli olan en önemli hususlardan biridir. Rotor diskleri üzerinde çap yönünde(radyal) oluşan gerilme 2.25 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde bulunur.

$$\sigma_R = \frac{(3+\nu)\gamma\omega^2(R_o - R_i)^2}{8g} \tag{2.25}$$

Diski teğetsel olarak eğmeye çalışan teğetsel gerilme ise 2.26 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde bulunur.

$$\sigma_T = \frac{\gamma\omega^2}{4g} \left[(3+\nu)R_o^2 + (1-\nu)R_i^2 \right] \tag{2.26}$$

Yukarıda 2.25 ve 2.26 numaralı eşitliklerde gösterilen değerler sırası ile disk malzemesinin çekme ve kayma gerilmeleridir. Yukarıda ki formüller kullanılarak türbinin çalışma hızının malzemenin sahip olduğu yapısal mukavemet değerlerine göre ortaya çıkan sınırları geçmemesi sağlanabilir. Örneğin; krom katkılı paslanmaz çelikten imal edilmiş, iç ve dış çap değerleri sırası ile 20 ve 100 mm olan bir diskin

30000 RPM hızda döndürülmesi durumunda ortaya çıkacak olan radyal gerilme; 202 N/mm^2 'dir. Bu değer seçilen malzemenin çekme gerilmesinin (413.61 N/mm^2) yaklaşık olarak yarısına denk gelmektedir ($v=0,28$, $\gamma=76518 \text{ N/m}^3$). Formülden hareketle, disk üzerine binen kuvvetin artan çap ve açısal hıza bağlı olarak artacağı anlaşılır. Bu noktada akla disklerin hangi açısal hız değerinde akmaya yani çapsal uzama göstermeye başlayacağı sorusu gelmektedir. Bu değer seçilen malzemeye, çalışma hızı ve sıcaklığına göre değişir.

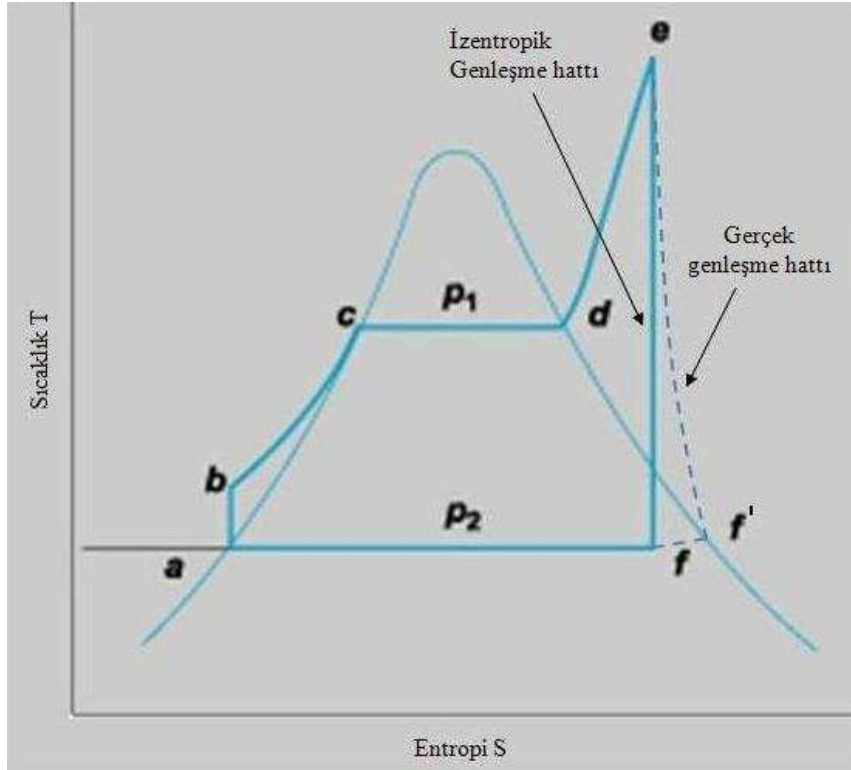
2.6.3 Tesla Türbini'nin Sektörel Uygulamaları

TT'nin verimi ile ilgili bilgiler çok çelişkili olmakla beraber literatürde ulaşılan en yüksek verim olarak %49 değeri göze çarpmaktadır. Bu değer 120000 rpm hızda Davydov ve Shestyuk[9] tarafından kaydedilmiştir. Nikola Tesla'nın ilk ürettiği prototiplerde %95 civarında verim değerlerine ulaştığına dair bilgiler olmakla beraber bu değere Tesla'yı takip eden uygulamalarda ulaşamamıştır. TT'nin belirli avantajları olmasına karşın verim değerinin kanatlı türbinlere nazaran halen düşük olması türbin sektöründe yer edinmemesinin başlıca sebebidir. Diğer taraftan araştırma amaçlı uygulamalar başta olmak üzere, konvansiyonel türbinlerin kullanamayacağı yakıtları kullanmak üzere TT uygulamaları denenmektedir[9]. TT çok yüksek açısal hızlara çıkamadığı taktirde düşük verim değerlerinde çalışmaktadır ve ürettiği tork değeri açısal hızın yükseldiği oranda artmamakta belli bir noktadan sonra neredeyse sabit kalmaktadır. Diğer taraftan bu özellikler çok fazlı ve yüksek frekanslı elektrik jeneratörlerinin tahriki için idealdir. Bu çerçevede çok fazlı ve yüksek frekanslı alternatör kullanılarak üretilmiş hibrit bir otomobil uygulaması yapılmıştır [30]. Bahsedilen bu uygulamalar haricinde sektörel uygulamaya rastlanamamıştır. TT'nin, imalatı ve bakım-onarım giderleri konvansiyonel türbinlere nazaran düşüktür. Bu bağlamda, TT'nin verim değerleri en azından kanatlı türbinlerin servis ömrü boyunca ortaya koyduğu finansal bilanço ile yarışır hale gelebilme ihtimaline sahiptir. Ayrıca küçük güçlü türbin uygulamaları için TT, nispeten daha kolay üretilebilmesi nedeni ile uygun görünmektedir. Bu nedenle alternatif bir güç yedekleme sistemi olarak hizmet eder hale gelmesi için çalışılan KGYS'nin birincil tahrikçi olarak TT kullanmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

3. SİSTEMİN TERMODİNAMİK MODELLEMESİ

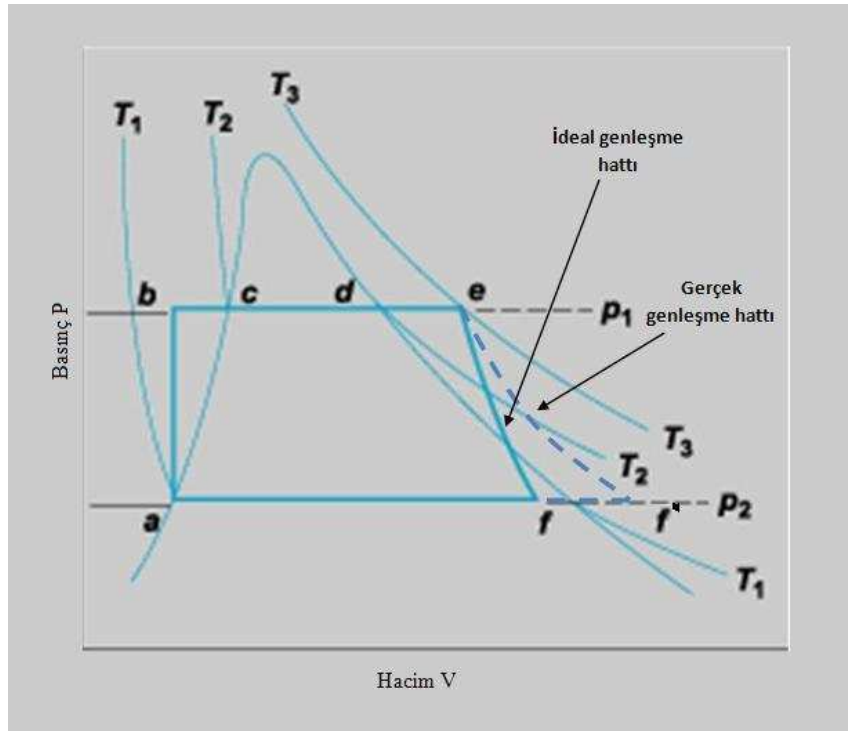
3.1 KGYS'nin Termodinamik Süreç Temelinde Değerlendirilmesi

KGYS'nin çevrimi; sıvılaştırma ünitesi bir kondansör olarak kabul edildiğinde konvansiyonel Rankine çevrimidir. Çalışma akışkanının yani azotun depolama amacı ile sıvılaştırılması ise genellikle gaz sıvılaştırma çevrimi olarak bilinen Claude ve Joule-Thompson çevrimleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma, güç üretimi ve türbin karakterizasyonu temelinde olduğundan sıvılaştırma kısmı sistemin ayrı bir parçası olarak kabul edilip sistemin çalışma çevrimi konvansiyonel Rankine çevrimi olarak düşünülebilir. Diğer taraftan sistem enerji yedekleme amaçlı olduğundan ve sıvılaştırarak depolama işlemi şebekeden elektrik beslemesi varlığında gerçekleştirilebildiğinden, KGYS'de iş üretimi açık buhar çevrimi çerçevesinde gerçekleşmektedir. Rankine çevriminin sıcaklık-entropi grafiği şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Temel Rankine çevrimine ait T-S diyagramı.

Şekilde kesikli çizgilerle gösterilen hat, gerçekte ortaya çıkan genişmeyi göstermektedir. Bu hattın eğri şeklinde olmasının sebebi gerçek genişmede kayıpların elimine edilemiyor oluşudur. Entropi eksenine dik konumda bulunan hat ise izentropik genişmeyi göstermektedir. Sistemin, şebekede elektrik olması durumunda atmosferden aldığı azot gazını sıvılaştırıp depolayacağı düşünüldüğünde KGYS çevrimi hemen hemen Rankine çevrimi gibi çalışmaktadır. Şekil üzerinde P_1 olarak görülen basınç kriyojenik depolama tankının basıncıdır. Bu basınç 38-40 bara kadar çıkarılabilir. Bunu yapabilmek için tank emniyet valfinin açma basıncı ve basınçlandırma regülatörünün çalışma basıncı ayarlanmalıdır. Tanktan sıvı azot çekilmesi durumunda azot termoelektrik jeneratör(TEG) monteli eşanjörde ısı almaya başlar ve eşanjörden sonra evaporatöre girerek kızdırılır. Tanktan gaz azot çekilmesi durumunda ise azot tankta buharlaşır ve takip eden devrede eşanjör ve sonrasında evaporatör vasıtası ile kızdırılır. Şekilde görülen e noktası kızgın azotun TT nozuluna girdiği noktadır. Bu çevrime ait P-V diyagramı ise 3.2 numaralı şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2 : Temel Rankine çevrimine ait P-V diyagramı.

Bu diyagramda a ve b noktaları arasındaki basınç artışı kriyojenik depolama tankının basınçlandırma eşanjörü vasıtası ile gerçekleştirilmektedir. TT'nin izentropik yani tersinir verimi 3.1 nolu eşitlikte gösterildiği gibi e ve f^1 noktalarının entalpileri

farkının e ve f noktalarındaki entalpi farkına bölümüdür. Bu oran bize izentropik olarak elde edilmesi mümkün olan işin gerçekte ne kadarının elde edildiğini gösterir.

$$\eta_s = \frac{h_e - f^1}{h_e - f} \quad (3.1)$$

Sistemin farklı basınçlarda çalışması durumunda evaporatör çıkış sıcaklığı 300 K kabul edilerek, türbin giriş ve çıkış noktalarındaki entalpi, entropi, kütleli debi ve özgül iş miktarları, TT verimi %40 kabul edilerek hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler 3.1 numaralı çizelgede verilmektedir.

Çizelge 3.1: Farklı giriş basınçlarındaki giriş ve çıkış entalpileri, entropileri, kütleli debi ve özgül iş miktarları(TT verimi %40, çıkış basıncı 1 Bar için).

P _G (Bar)	ΔP (Bar)	T _G (K)	T _{C(s)} (K)	h _e (kJ/kg)	h _f (kJ/kg)	S _e (kJ/kg-K)	S _f (kJ/kg-K)	m (kg/s)	W (kJ/kg-N ₂)
40	39	300	221,8	302,85	228,8	5,72	6,532	2,55x10 ⁻²	78,43
30	29	300	225,4	304,93	232,8	5,83	6,547	2,61x10 ⁻²	76,62
25	24	300	227,8	305,97	235,6	5,88	6,554	2,73x10 ⁻²	73,26
20	19	300	231,1	307,01	239,3	5,94	6,574	2,83x10 ⁻²	70,67
15	14	300	235,3	308,09	243,6	6,04	6,591	3,01x10 ⁻²	66,44
10	9	300	242,1	309,17	251,2	6,15	6,624	3,32x10 ⁻²	60,24
9	8	300	244,0	309,41	253,1	6,18	6,633	3,46x10 ⁻²	57,81
8	7	300	246,2	309,62	255,5	6,22	6,647	3,59x10 ⁻²	55,71
7	6	300	248,8	309,84	258,3	6,26	6,652	3,65x10 ⁻²	54,81
6	5	300	251,9	310,06	261,1	6,31	6,661	4,02x10 ⁻²	49,75
5	4	300	255,7	310,28	264,8	6,36	6,678	4,37x10 ⁻²	45,76
4	3	300	260,7	310,49	270,3	6,43	6,742	4,87x10 ⁻²	41,06
3	2	300	267,6	310,71	277,9	6,53	6,724	6,03x10 ⁻²	33,16
2	1	300	278,4	310,94	288,4	6,63	6,774	8,89x10 ⁻²	22,49

Yukarıdaki çizelgede özgül iş W simgesi ile belirtilmiştir ve çalışma basınçlarına göre 1 kg azot kullanılarak toplamda elde edilebilecek iş miktarını göstermektedir. Çizelgede belirtilen değerlerdende görüldüğü gibi sistemin çalışma basıncındaki yükselmeye bağlı olarak birim kütle başına elde edilen iş miktarı da artmaktadır. Çizelge 3.1’de TT çıkışı için bulunan sıcaklık değerleri %40 izentropik genişleme gerçekleştiği kabul edilerek, 3.2 numaralı eşitlikte verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$\frac{T_c}{T_G} = \left(\frac{P_c}{P_G} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)} \quad (3.2)$$

3.2 numaralı eşitlikte k simgesi adyabatik üs veya özgül ısılar oranı olarak adlandırılmaktadır. Adından da anlaşıldığı gibi bu oran C_p/C_v değeridir. Azot için bu değer normalde yaklaşık olarak 1.4 tür.

3.1 nolu çizelgede çeşitli basınç değerlerine karşılık gelen kütleli debi miktarları verilmiştir. Bu kütleli debinin sağlanabilmesi evaporatör kapasitesine bağlı olarak değişebilir. Tankın basınçlandırma eşanjörü nispeten daha az ısı girdisine ihtiyaç duyduğundan basınçlandırma sorunsuz olarak gerçekleşmektedir. Diğer taraftan azotun kızdırılması buharlaştırıcının toplam yüzey alanına, dış ortamın ihtiva ettiği nem miktarına, buharlaştırıcının toplamda ne sıklıkla ve ne kadar çalıştığına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Buharlaştırıcının üretici tarafından belirlenen özelliklerini belirten plaka şekil 3.3'te görülmektedir.

ARTIŞ BASINÇLI KAPLAR SAN. A.Ş.	
MÜHÜR MAX. PAROLU ÜNAL CAD. DEMİRCİLER KÖYÜ 2 ÇEVRESEL BÜYÜKLERİ YOLU 4. KATMANLI 1. FİRKA Tel: +90 312 384 36 22 gsm. Fax: +90 312 384 36 21 www.artis.com.tr e-mail: artis@artis.com.tr	
ONAY NO APPROVAL NO	ARV09-018
DESAYN KODU DESIGN CODE	AD-2000
EXPANMAN TİPİ TYPE OF EQUIPMENT	T. A. EVAPORATÖR
SERİ NUMARASI SERIAL NO.	2009/067-2
MALAT YILI YEAR OF CONSTRUCTION	2009
ANA MALZEME MAIN MATERIAL	3. 3206
TEST BASINCI TEST PRESSURE	60 Bar
MAX. ÇALIŞMA BASINCI MAX. WORKING PRESSURE (PW)	40 Bar
DESAYN SICAKLIĞI DESIGN TEMPERATURE	-196/+50 °C
MIN. ÇALIŞMA SICAKLIĞI MIN. WORKING TEMPERATURE	-196 °C
AKIŞ KAPASİTESİ FLOW CAPACITY	80 Nm ³ /h
MAX. BOŞ AĞIRLIK MAX. EMPTY WEIGHT	80 Kg
TEST TARİHİ & KONTROL TEST DATE & INSPECTION BY	17.02.2009
YERLİK SICAKLIĞI (PROBENT TEST) ** ÇIKIŞ SICAKLIĞI (OUTLET)	

AKIŞ KAPASİTESİ FLOW CAPACITY	8 h/d, %75 RH, 20°C AT*, 10°C DT** 80 Nm ³ /h
----------------------------------	---

Şekil 3.3 : KGYS evaporatörünün üretici firma tarafından verilen özellikleri.

Bu değerler evaporatörün; 20 °C sıcaklıkta, %75 bağıl nemde ve günde sekiz saat çalıştırılması durumunda 10 °C çıkış sıcaklığında 80 Nm³/saat azot sağlayacağını belirtmektedir. Burada anlatılmak istenen kısımlara ait değerleri gösteren bölüm seçilerek daha görünür bir boyutta verilmiştir. Evaporatörün sürekli yüksek debide çalışması buzlanma hızını arttıracığından gazın çıkış sıcaklığı düşmeye başlayacaktır. Isı değiştiricinin dış yüzeyinin buzla kaplanması ısı geçişine ciddi manada engel olmaktadır. Sekiz saatten fazla çalıştırılması durumunda aşırı buzlanma nedeni ile çıkış sıcaklığı aynı şekilde azalacaktır. Düşük debide çalışma durumunda ise çıkış sıcaklığı ortam sıcaklığına yaklaşacaktır. Ortamın bağıl neminin düşük olması ise evaporatör ısı geçiş yüzeylerinin daha geç buzlanmasını sağlayacağından çıkış sıcaklığı üzerinde yükseltici etki yapacaktır. Sistemin farklı çalışma basınçlarında ihtiyaç duyduğu hacimsel debi ve 2 kW güçte sekiz saatlik çalışma için ihtiyaç duyulan azot miktarları çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2:Farklı giriş basınçları için gerekli olan hacimsel debi ve 2 kW güçte sekiz saatlik çalışma için gerekli olan azot miktarları(dış ortam sıcaklığı 35 °C, bağıl nem % 50, TT verimi %40).

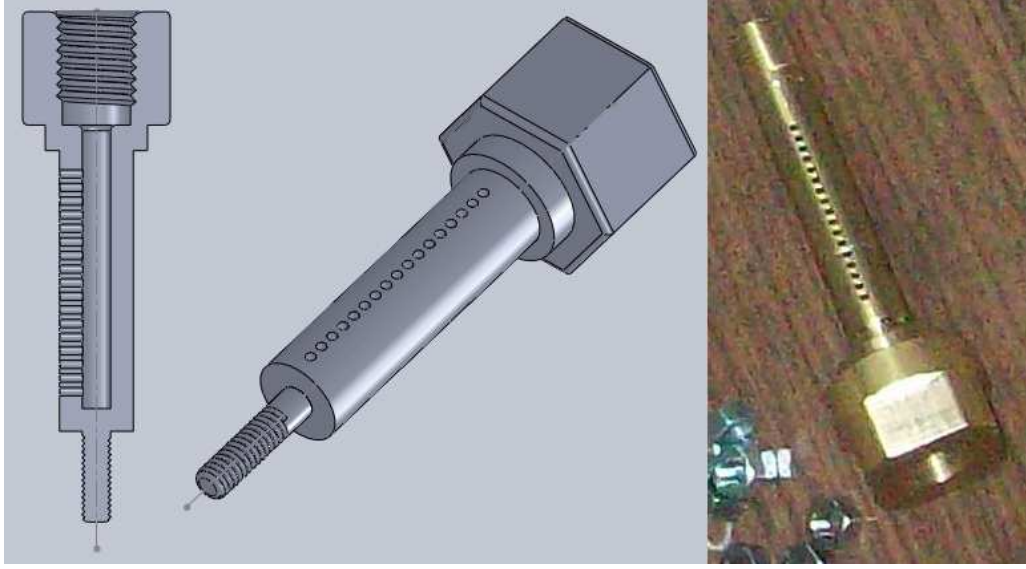
P_G (Bar)	ΔP (Bar)	T_G (K)	T_C (K)	W_s (kJ/kg)	m (kg/s)	V (m ³ /saat)	M_T (kg/16 kW-s)
40	39	300	104,5	195,55	$2,55 \times 10^{-2}$	2.03594	734.42
30	29	300	113,5	190,93	$2,61 \times 10^{-2}$	3.12774	751.68
25	24	300	119,6	182,97	$2,73 \times 10^{-2}$	3.81749	786.24
20	19	300	127,5	176,31	$2,83 \times 10^{-2}$	4.52326	815.04
15	14	300	138,4	165,60	$3,01 \times 10^{-2}$	7.22203	866.88
10	9	300	155,4	150,21	$3,32 \times 10^{-2}$	10.6252	956.16
9	8	300	160,1	144,15	$3,46 \times 10^{-2}$	12.4584	996.48
8	7	300	165,6	139,31	$3,59 \times 10^{-2}$	14.3650	1033.92
7	6	300	172,1	136,85	$3,65 \times 10^{-2}$	17.0419	1051.21
6	5	300	179,8	124,11	$4,02 \times 10^{-2}$	21.4532	1157.76
5	4	300	189,4	114,31	$4,37 \times 10^{-2}$	27.9903	1258.56
4	3	300	201,8	102,51	$4,87 \times 10^{-2}$	38.9981	1402.56
3	2	300	219,2	82,83	$6,03 \times 10^{-2}$	72.4490	1736.64
2	1	300	246	56,23	$8,89 \times 10^{-2}$	142.432	2560.32

Çizelgeden görüldüğü gibi evaporatörün belirtilen ortam şartlarında, giriş basıncının yüksek olması durumunda sistemi sorun yaşamadan besleyeceği söylenilebilir. Fakat basıncın düşüşüne ve artan debiye bağlı olarak evaporatör ve türbin veriminin azalması öngörüldüğünden buharlaştırıcının düşük basınçlarda yetersiz kalacağı açık şekilde görülmektedir.

3.2 Farklı Basınç Değerleri için Nozulun Değerlendirilmesi

Çalışma akışkanının basıncının düşüp hızının arttığı eleman olan nozul, Tesla Türbini'nin en önemli parçalarından biridir. Çalışma basıncına bağlı olarak elde edilebilecek hızın mümkün olan en yüksek verimde oluşması TT'nin verimi açısından en önemli hususlardandır. Akışkanın verimli hızlanamaması en başından kaybedilen iş anlamına gelmektedir. İstenilen düzeyde bir hızlanmadan sonra çalışma akışkanının yoğunluğu, TT rotor disklerinin aralık miktarları, türbinin çalışma hızı, türbinden talep edilen tork değeri gibi etkenler TT'nin ürettiği toplam güç miktarını belirlemektedir.

Yapısına bağlı olarak verim değerleri değişse de nozul görevi üstlenen bir parçanın yaptığı iş temelde basınç farkından kaynaklanan entalpi farkını hıza dönüştürmektir. Deneysel amaçlı üretilen TT'ne ait nozulun solidworks programında çizilmiş resmi ve gerçek fotoğrafı şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4 : TT nozulunun solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.

Şekilde görülen parça ve öncesindeki devre elemanları sebebi ile izentropik genişleme sağlamak mümkün olmamaktadır. Nozulun bu şekilde imal edilmiş olması tamamen imalat zorluklarını elimine etmek amacı ile tercih edilmiş bir yöntemdir. Daha verimli bir genişleme için nozul girişinde, maksimum yük durumunda dahi akışkanın gerekli olan basınç değerinin altına düşmemesini sağlayacak bir devre oluşturmanın ve izentropik genişlemeye yaklaşmayı sağlayacak yapıda daralan-genişleyen türden bir nozul kullanmanın faydalı olacağı rahatlıkla söylenilebilir.

Bu sistemde kullanılan çalışma akışkanı olan azotun türbine giriş sıcaklığında ideal gaz kabul edilmesi mümkündür. İdeal bir gazın izentropik genişleme sağlayan bir nozuldan çıkış hızının karesi giriş ve çıkış entalpileri farkının iki katına eşittir.

$$V = \sqrt{2(h_G - h_C)} = \sqrt{2C_p(T_G - T_C)} \quad (3.3)$$

3.3 numaralı eşitlikte belirtilen giriş değerleri izentropik genişleme hedeflenen bir sistemde durağan hal(stagnasyon) değerleri olarak kabul edilebilir. Bunun anlamı nozul öncesindeki sistemde, akışkanın hareketinden veya konumundan doğan enerji farklılıklarının olmamasıdır. Yani kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin ihmal edilebilecek kadar küçük değerde olması gerekmektedir. Bu koşul giriş devresinin ısı yalıtım performansı ve akışa mümkün olan en az direnci gösterecek nakil elemanlarının varlığı ile sağlanabilir. Fakat sistem zaten dış ortamdan ısı aldığından KGYS'nin belli kısımlarında ısı yalıtımı gerekli değildir.

Çalışma akışkanının nozul giriş ve çıkışlarında sahip olduğu entalpi hıza ne kadar verimli dönüşürse, TT rotorunda disk aralıkları o kadar küçültülebilir ve disk çapları

akışkanın TT rotorunun sürtünme direncini yenebilme kabiliyetine bağlı olarak o kadar büyütülebilir. Bunun anlamı birim hacme düşen disk sayısının ve dolayısı ile üretilen iş miktarının artmasıdır.

Çizelge 3.3 : İzentropik genişleme durumunda farklı giriş basınçları için ortaya çıkan nozul çıkış hızları.

P_G (Bar)	ΔP (Bar)	T_G (K)	T_C (K)	W_S (kJ/kg)	V_s (m/s)
40	39	300	104,5	195,55	637.6833
30	29	300	113,5	190,93	622.8322
25	24	300	119,6	182,97	612.5618
20	19	300	127,5	176,31	598.9992
15	14	300	138,4	165,62	579.7655
10	9	300	155,4	150,21	548.4232
9	8	300	160,1	144,15	539.4367
8	7	300	165,6	139,30	528.7268
7	6	300	172,1	136,85	515.9845
6	5	300	179,8	124,11	500.016
5	4	300	189,4	114,31	479.6332
4	3	300	201,8	102,50	451.9469
3	2	300	219,2	82,831	409.9561
2	1	300	246,2	56,230	335.1418

Şekil 3.4'te görülen nozul üzerinde 17 tane 1.5 mm çapında delik bulunmaktadır. Bu deliklerin toplam alanı $3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 'ye eşittir. Nozulun ve bağlı olduğu devrenin yapısı sebebi ile oluşan genişleme verimsizdir. Yapılan ölçümlerde giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark maksimum $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçülmüştür. Türbin rotor çapının 0.1 metreden küçük olduğu göz önüne alındığında, boşa çalışma durumunda rotor dış çap ucu çizgisel hızının nozul çıkış hızına eşit olduğu durumda dahi türbinin 50000 rpm hızla döndüğü varsayıldığında, çıkış hızı 260 m/s olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum nozul veriminin çok düşük olduğunu düşündürmektedir. Bu düzeydeki hızları ölçebilecek imkanlardan yoksun olunması bu düşüncenin teyit edilmesini engellemiştir. Çizelge 3.3'te azotun izentropik olarak genişmesi durumunda farklı giriş basınçlarında ortaya çıkan hızlar verilmiştir. Nozul TT'nin en önemli parçalarından biridir ve bu çalışmadan sonra gerçekleştirilmesi planlanan geliştirme çalışmalarında özel olarak ele alınacaktır. Nozulda sağlanılacak olan genişlemenin izentropik genişlemeye mümkün olduğunca yakın olması sistemin verimli çalışmasının kilit noktalarından biridir.

3.3 KGYS'nin İzotropik ve İzotermal İş Kapasitesi

Kriyojenik güç yedeklemesi amacı ile oluşturulan sistemin toplamda 96 kWh kapasitede olması ve 2 kW güç üretmesi planlanmaktadır. Sıvılaştırma ünitesi sisteme henüz dahil edilemediğinden, sıvı azot kendinden basınçlandırılmalı kriyojenik depolama tankına harici olarak alınmaktadır. Bu durumda sistem depolama ünitesi ve sonrası olarak düşünüldüğünde termodinamik olarak üç aşamada değerlendirilebilir. Bunlar; sıvı azotun atmosferden ısı alarak(kriyotank basınçlandırıcı eşanjörü ile) sabit hacimde basıncının yükselmesi, yine atmosferden alınan ısı ile buharlaştırılan gaz azotun atmosferden ısı alarak ortam sıcaklığına veya yakınında bir sıcaklık değerine kadar kızdırılması ve son olarak türbinde basınçlı gazdan işi üretimi şeklinde sıralanabilir. Depolama tankının maksimum çalışma basıncı, üretici firma tarafından 38-40 Bar olarak verilmiştir. Sistemin mümkün olan en yüksek basınçta çalıştırılmasının, basınçlandırma ve ısınmada harcanan enerji atmosferden alındığı için üretilen işte artış sağlayacağı açıktır. Diğer taraftan sistemin debi kontrolörünün maksimum çalışma basıncı(8.6 Bar) tanka nazaran oldukça düşüktür. Sistemin istenilen basınç değerinde çalışabildiği varsayılarak kütleli debi hesapları yapılacaktır.

Yukarıda ki çizelgeden de anlaşılacağı üzere KGYS'nin yüksek basınçlarda ciddi bir enerji kapasitesi bulunmaktadır. Bu kapasiteden mümkün olan en üst seviyede yararlanabilmek kriyojenin verimli depolanması ve verimli bir iş üretimi ile mümkün olabilecek bir husustur. Prototip olarak ortaya koyulan sistemde verim düşük olmasına karşın sistemin bazı özelliklerinin iyileştirilmesi durumunda gelecekte enerji depolama konusunda alternatif çözümlerden biri haline gelmesi muhtemeldir. Yukarıda sistemin potansiyelini ifade etmek amacı ile oluşturulan çizelgeler, termoelektrik jeneratör(TEG) ünitesi hesaplara dahil edilmeden yapılmıştır. Bu nedenle termoelektrik jeneratör(TEG) ünitesinden de ısı geçişine ve TEG verimine bağlı olarak belirli miktarda enerji girdisi elde edilecek olması, TT'nde harcanan azot miktarını da azaltacağından sistemin iş potansiyeli ve çalışma süresinde de uzama sağlanacaktır. Sistemin sahip olduğu potansiyeli ortaya koyma konusunda faydalı olacağı düşünülerek, sistemin üretebileceği ideal, izotropik ve izotermal iş miktarları, farklı giriş basınçları ve farklı birimler için hesaplanarak 3.4 numaralı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Farklı giriş basınçları için farklı birimlerde hesaplanan isentropik ve izotermal iş miktarları.

P_G (Bar)	ΔP (Bar)	T_G (K)	T_C (K)	W_s (kJ/kg)	W_s (kJ/m ³)	W_T (kJ/kg)	W_T (kJ/m ³)	m (kg/s)
40	39	300	104,5	195,5	8817	327,5	14769	$2,55 \times 10^{-2}$
30	29	300	113,5	190,9	5735	328,1	9858	$2,61 \times 10^{-2}$
25	24	300	119,6	182,9	4710	304,1	7829	$2,73 \times 10^{-2}$
20	19	300	127,5	176,3	3976	266,2	5996	$2,83 \times 10^{-2}$
15	14	300	138,4	165,6	2484	259,1	3888	$3,01 \times 10^{-2}$
10	9	300	155,4	150,2	1678	204,8	2303	$3,32 \times 10^{-2}$
9	8	300	160,1	144,1	1441	196,7	1967	$3,46 \times 10^{-2}$
8	7	300	165,6	139,3	1253	185,1	1664	$3,59 \times 10^{-2}$
7	6	300	172,3	136,8	1055	174,8	1348	$3,65 \times 10^{-2}$
6	5	300	179,8	124,1	837	159,4	1075	$4,02 \times 10^{-2}$
5	4	300	189,4	114,3	642	143,2	805	$4,37 \times 10^{-2}$
4	3	300	201,8	102,5	460	123,3	554	$4,87 \times 10^{-2}$
3	2	300	219,2	82,8	248	98,2	294	$6,03 \times 10^{-2}$
2	1	300	246,1	56,2	126	61,7	138	$8,89 \times 10^{-2}$

KGYS adını verdiğimiz güç yedekleme sisteminin şarj-deşarj ömrünün teorik olarak sınırsız olması en büyük avantajı olarak gösterilebilir. Sonuç olarak sistemin depolama ve enerji dönüşüm performansının artırılması bu sistemi kullanılabilir bir ürün haline getirecektir. Enerji dönüşümünün büyük güçlü konvansiyonel türbinlerle %90 civarında verimlerle sağlandığı bir gerçektir. Ancak bu tür yüksek verimli makineler düşük güçlerde rastlanılmamaktadır. Bu nedenle TT bu sistem için en uygun enerji dönüşüm elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.4 KGYS'nin İşletme Maliyeti

3.1 numaralı şekildeki diyagram üzerinde gösterilen e ve a noktalarının entalpi farkı sistemin atmosferden soğurduğu ısı miktarını verir. Normal durumda sistemin genel ısı verimi; elde edilen toplam iş(ısı) miktarının sisteme verilen toplam iş(ısı) miktarına oranıdır. Fakat KGYS süreci dahilinde azotun buharlaştırılması ve kızdırılması için harcanılan enerji atmosferden alındığı için daha doğrusu bu süreç için yakıt anlamında gider olmadığından, ekonomik olarak bu oran fazla bir şey ifade etmez. Sistemin ne kadar verimli çalıştığı, enerji depolama amaçlı kullanılan kriyojenin ne oranda verimli depolanabildiği ve sistemden toplamda ne kadar iş elde edildiği ile alakalıdır. Bu sistemin ekonomik olarak kullanılabilirliği ve diğer enerji depolama sistemleri ile rekabet edebilir olması bir çok farklı değişkene bağlıdır. Örneğin kriyojen depolama ekipmanları nispeten pahalıdır ve bu bir dezavantaj teşkil

etmektedir. Aşağıda, çeşitli kabullerde bulunularak sistemin işletiminin ekonomik boyutu hakkında fikir verilmeye çalışılmıştır.

Azot sıvılaştırma için özgül iş miktarı 0.207 (kW-saat/kg) olarak verilmektedir[31]. Bu oran gelişmiş bir sıvılaştırma sisteminin ideal ısı maliyeti olarak verilmektedir. Sistemin daha düşük verimli bir sıvılaştırma ünitesi olacağını varsayarak bu değer 0.6 (kW-saat/kg) kabul edilmiştir. KGYS'nin depolama ünitesi olan kriyojenik tankın günlük sıvı kayıp miktarı üretici tarafından % 0,43(15 °C ortam sıcaklığında) olarak verilmektedir. Yine kötümser bir yaklaşımla bu değer % 0,8 kabul edilmiştir. Yapılan çalışmalar sırasında tankta depolanan azotun kaybedilme miktarı bu değerlerin tankın sahip olduğu toplam hacim üzerinden kayıp olduğunu göstermiştir. Son olarak TT izentropik verimini % 40 kabul ederek sistemin farklı çalışma basınçlarında gösterdiği maliyetler çizelge 3.5'te verilmektedir. Çizelgede verilen günlük sıvılaştırma gideri tankın ortalama kayıp ve ortalama kullanıma bağlı azalma miktarlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. KGYS'nin her ay toplamda 2 gün elektrik kesintisi ile karşılaşan bir sistemi yedeklediği kabul edilmiştir.

Çizelge 3.5 : Farklı giriş basınçları için hesaplanan işletim maliyetlerine ait değerler(dış ortam sıcaklığı 15 °C ve TT verimi % 40, elektrik fiyatı 0.2 TL/kWh).

P_G (Bar)	ΔP (Bar)	W_s (kJ/kg)	m (kg/s)	m (kg/g)	Sıv.Gid (TL/g)
40	39	195,55	$2,55 \times 10^{-2}$	159,2	31,82
30	29	190,93	$2,61 \times 10^{-2}$	162,8	32,51
25	24	182,97	$2,73 \times 10^{-2}$	169,7	33,95
20	19	176,31	$2,83 \times 10^{-2}$	175,5	35,12
15	14	165,62	$3,01 \times 10^{-2}$	185,8	37,17
10	9	150,20	$3,32 \times 10^{-2}$	203,7	40,74
9	8	144,15	$3,46 \times 10^{-2}$	211,8	42,35
8	7	139,31	$3,59 \times 10^{-2}$	219,3	43,85
7	6	136,85	$3,65 \times 10^{-2}$	222,7	44,54
6	5	124,11	$4,02 \times 10^{-2}$	244,1	48,81
5	4	114,32	$4,37 \times 10^{-2}$	264,2	52,84
4	3	102,51	$4,87 \times 10^{-2}$	293,2	58,62
3	2	82,83	$6,03 \times 10^{-2}$	359,8	71,96
2	1	56,23	$8,89 \times 10^{-2}$	524,5	104,91

Değişen çalışma basınçlarına bağlı olarak tank içindeki sıvının sıcaklığı da artacağından diğer bir deyişle sıvı daha yüksek sıcaklıkta buharlaşacağından, tank iç cidarının sıcaklığı da yükselecek ve bu yükseliş sıcaklık gradyenini azaltacağından kayıp değişimini hassas şekilde hesaplamak, özellikle katı ve sıvıların ısı iletim katsayılarının kriyojenik sıcaklıklarda ciddi oranda değişim göstermesi sebebi ile oldukça zordur. Bunun yerine tankın kaybettiği kriyojen miktarının her 1 Bar basınç yükselmesine karşılık binde 5 oranında azaldığı kabul edilmiştir. Sistemin işletme maliyeti hesaplanırken; sigorta bedeli, bakım onarım giderleri, azot sıvılaştırma giderleri, amortisman bedeli gibi çeşitli faktörler dahil edilmelidir. Yukarıda hesaplanan değer sistemin aktif yedekleme sağlama durumunda gerekli olan sıvı azot maliyetidir. Çizelgeden de görüldüğü gibi yükselen işletme basıncına bağlı olarak işletim giderleri(azot sıvılaştırma bedeli) azalmaktadır. Aslında bu değer basıncın düşüşüne bağlı olarak daha yüksek bir oranda artması beklenebilir. Bunun sebebi düşen basınca bağlı olarak TT veriminin de düşecek olmasıdır.

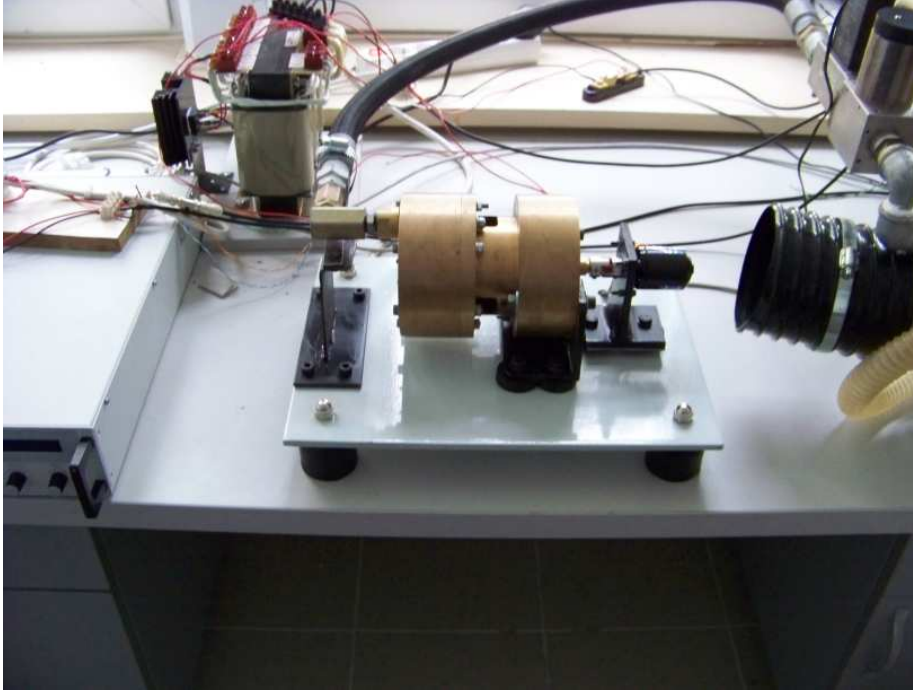
4. TESLA TÜRBİNİNİN KARAKTERİSTİKLERİ VE TASARIMI

4.1 Türbinin Karakteristik Özellikleri

Tesla Türbininin en önemli özellikleri; çok yüksek hızlara çıkabiliyor olması ve kanatsız rotor yapısıdır. Nozulun verimine bağlı olarak çalışma akışkanının ulaştığı son hız, türbin milinden direkt olarak talep edilen tork, rotor verimi, yükselen açılal hıza ve kullanılan malzemeye bağlı olarak rotor disklerinin dış çapında meydana gelen uzama miktarı gibi büyüklükler türbinin ulaşabileceği hızı sınırlayan faktörlerden bazılarıdır. Tesla türbininde, nozuldan çıkan akışkan sabit aralıklarla dizilmiş disklerden oluşan bir rotora teğetsel olarak gönderilir. Disklerden oluşan rotora teğetsel olarak gelen akışkan disklerin aralarından geçerek disk merkezine yakın bir noktada konumlanmış egzozlardan türbini terk eder. Akışın bu yönde olması TT'nin neredeyse hiç darbe yüzeyi olmaması anlamına gelmektedir. Bu sebeple özellikle buhar türbini olmak üzere konvansiyonel türbinlerde karşılaşılan kavitasyon problemi bu türbinlerde neredeyse hiç yoktur. Bu nedenle TT'nin akışta meydana gelebilecek faz değişkenliklerine karşı hassasiyeti çok azdır. Türbinin bu özelliği, konvansiyonel türbinlerde kullanılması oldukça sıkıntılı olan yakıtların ve buhar türbinleri için sıkıntı doğuran yaş buharın kullanımına olanak sağlamaktadır[9]. Sürtünme türbini olarak ta adlandırılan bu türbinler konvansiyonel türbinlere nazaran çok daha kolay üretilmektedirler. TT disklerden oluşan rotor yapısından dolayı şayet iyi bir yataklama sağlanmışsa uzun süre bakıma ihtiyaç duymadan çalışabilir. TT; günümüzde kullanılan, enerji üretim sektörüne hakim makinelerin sahip oldukları verim değerleri ile yarışabilmesi ve talep edilen güç skalasında üretilmesi durumunda tercih edilebilir bir ilk tahrikçidir.

Bu çalışma kapsamında üretilen türbinin rotor çapı 95 mm'dir. Bu rotorun içinde çalıştığı mahfazanın dış çapı ise 140 mm'dir. Türbinin gövde görevi gören parçası ile birlikte toplam boyu 170 mm'dir. Ölçüm sisteminin limitleri sebebi ile yüksek basınçlarda ölçüm yapılamamış fakat görsel olarak türbinin tahrik ettiği jeneratörün limitleri test edilmiştir. Türbinin tahrik ettiği yüksek frekanslı alternatörün maksimum gücü 1840 Watt ve bu güçte çalışabildiği maksimum hız ise 11000 dir.

Türbin giriş basıncı kademeli olarak yükseltip alternatörün limitlerinde hatta üzerinde üretim yapması sağlanmıştır. Sistemin bir elemanı olarak görev yapan elektronik DC yük haricinde, lambalardan oluşan bir de pano bulunmaktadır. Elektronik yük haricinde bu panoyu kullanarak neredeyse bir kahve fincanı büyüklüğündeki bu alternatörün ürettiği boyutuna göre muazzam güç görülmüştür. Türbin ve alternatör 4.1 numaralı şekilde görülmektedir.



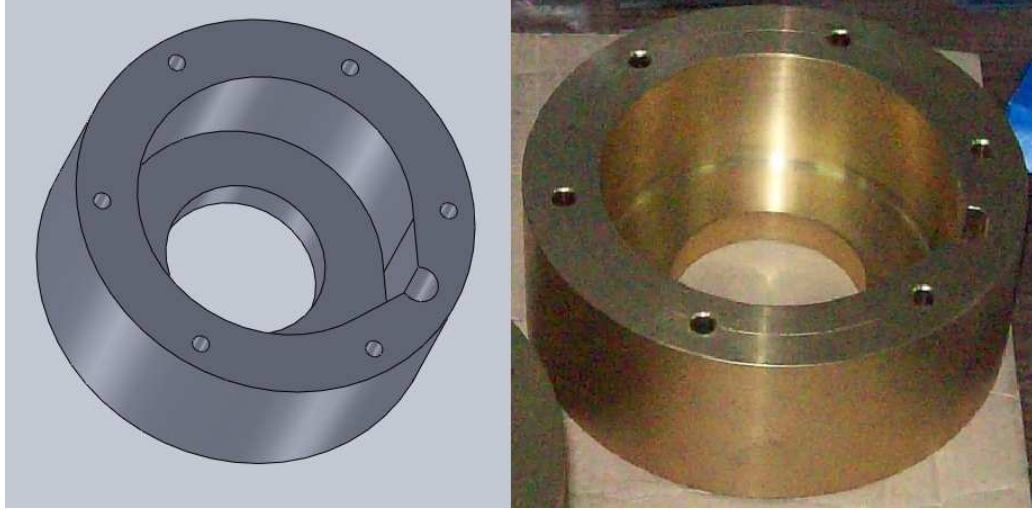
Şekil 4.1 : Tesla Türbini ve miline akuple alternatör.

Tesla türbini sistemde azot bulunmadığı zaman aynı sisteme entegre basınçlı hava hattından beslenerek çalıştırılabilmektedir. Alternatörün ürettiği yüksek frekanslı gerilim 24, 36, 48, 60 ve 72 volt çıkışları olan transformatöre girilerek belirtilen değerlerde gerilimler elde edilebilmektedir.

4.2 Türbini Oluşturan Parçalar

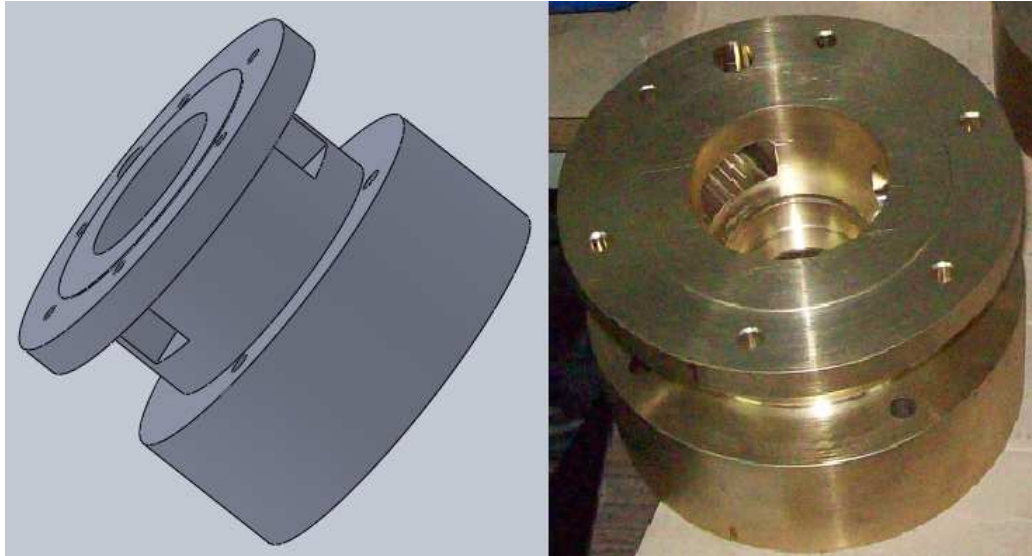
Deneysel amaçlı üretilen türbini oluşturan beş temel eleman gösterilebilir. Bunlar rotor disklerinin içinde döndüğü mahfaza, mil yataklık ve eksenleme yapan ve aynı zamanda mahfaza kapağı görevi gören gövde, disk grubunun çift taraftan egzoz yapabilmesine olanak veren mil, birbirine göre 1.5 mm aralıkla konumlanmış disk grubu ve havayı diskler arasındaki boşluklara teğetsel olarak üfleyen nozuldur.

TT'nin imalatında sayılan bu parçalar haricinde irili ufaklı birçok eleman kullanılmıştır. Çalışmanın tekil olarak amacı imalat olmadığından bu kısımda verilen detaylar yeterli görülmüştür. Yukarıda sayılan ana parçaların solidworks programında çizilmiş resimleri ve fotoğrafları aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



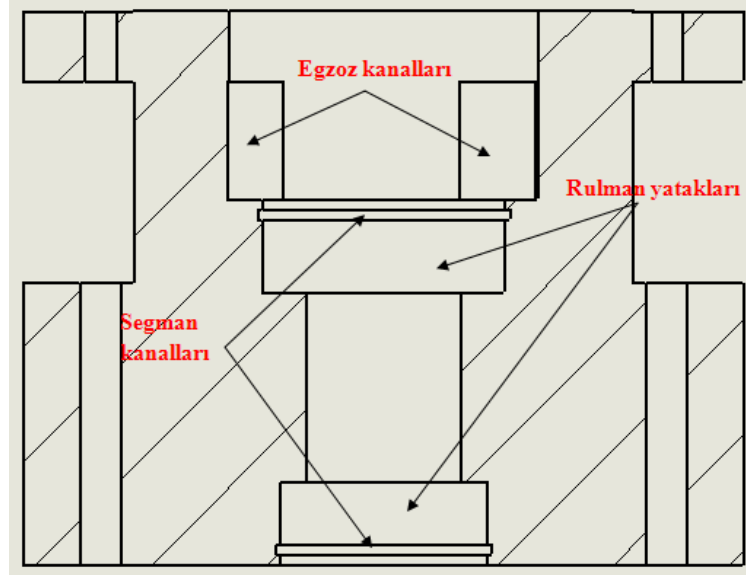
Şekil 4.2 : TT mahfazasının solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.

Şekil 4.2'de görülen parça, nozulun kendi ekseninde hareketine olanak vererek, rotorun saat yönünde ve tersi yönde dönebilmesine olanak vermektedir. Bu parça pirinç malzeme kullanılarak torna, matkap ve freze tezgahları yardımı ile üretilmiştir.

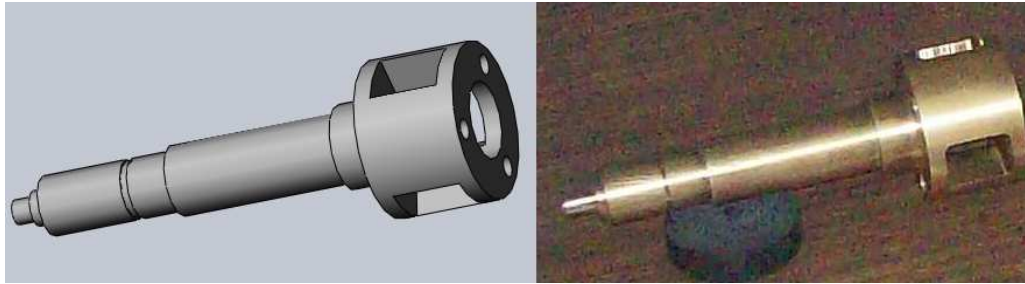


Şekil 4.3 : TT'ne ait gövdenin solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.

Şekil 4.3’de görülen parça TT’inde mahfaza kapağı, egzoz ve yataklama sağlamaktadır. Parçanın içine yerleştirilen 2 adet 60000 RPM limit hızda çalışabilen rulman sayesinde rotor mili yataklanmaktadır. Rotorun dönüş hızı ve parçalar arasındaki klerenslerin ne kadar küçük olduğu düşünüldüğünde yataklama hassasiyetinin önemi daha rahat anlaşılacaktır. Türbin rotoru 30000 RPM gibi çok yüksek hızlara ulaşırken mahfaza ile disk dış çapı arasındaki mesafe 1 mm’den azdır. Şekil 4.4’te ise bu parçaya ait kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.4 : TT’ne ait gövdenin dikey kesit resmi.



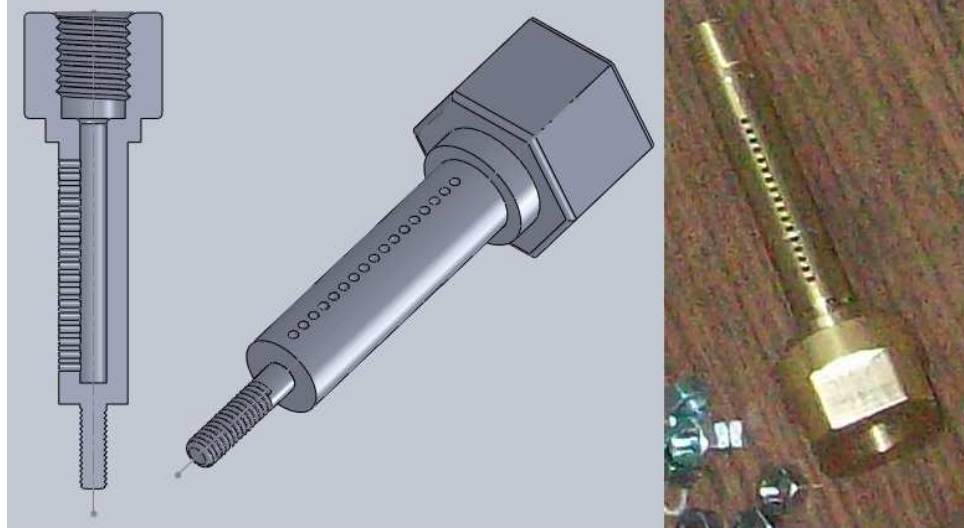
Şekil 4.5 : TT’ne ait milin solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.

Türbine ait mil ise 4.5 numaralı şekilde görülmektedir. Bu parça üzerinde bulunan kanallar vasıtasıyla rotor diskleri mahfazanın her iki tarafından da egzoz yapabilmektedirler. Bu parça torna, matkap ve freze tezgahları yardımıyla imal edilmiştir. Parça üzerinde rulmanların oturacağı federler bulunmaktadır. 4.4 numaralı şekilde görülen yataklara outran rulmanlar 4.5 numaralı şekildeki mili yataklamaktadır.



Şekil 4.6 : Disk grubu ve milin birlikte çekilmiş fotoğrafı.

Mile, birbirine göre yüz yirmi derecelik açılarla konumlanmış 3 adet civata ile bağlanmış disklerden oluşan rotor 4.6 numaralı şekilde görülmektedir. Burada kullanılan diskler ağırlık açısından oldukça homojen olan eski bilgisayar hard drive diskleridir. İleride yapılması planlanan türbinler için disk imalatı da yapılması planlanmaktadır.



Şekil 4.7 : Nozulun solidworks programında çizilmiş resmi ve fotoğrafı.

Türbine ait nozul 4.7 numaralı şekilde görülmektedir. Nozul üzerinde 17 adet 1.5 mm çapında delik bulunmaktadır. Bu delikler vasıtası ile her bir disk aralığına ayrı ayrı akışkan gönderilmektedir.

Üretilen turbine ait ana parçalar yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. Üretilen türbin için bu parçalar haricinde irili ufaklı bir çok parça kullanılmıştır. Bu parçaları liste halinde vermek yerine bir fotoğraf yardımı ile göstermek daha uygun olacaktır. Türbinini oluşturan parçaların montaj için bekleyen son hali 4.8 numaralı şekilde görülmektedir.



Şekil 4.8 : Türbini oluşturan parçaların genel görünüşü.

Türbinin tahrik ettiği 3 fazlı yüksek frekanslı alternatör 4.8 numaralı şekilde görülmektedir. Bu alternatör dıştan rotorlu 6 çift kutuplu bir motordur. Motor olarak kullanıldığında boşta uygulanan her 1 voltluk gerilime karşılık 500 rpm hız üretmektedir. Maksimum gerilimi üreticisi tarafından 22 volt olarak verilmiştir. Bu gerilimde ulaştığı limit hız 11000 rpm olmaktadır. Fakat türbinin ulaşabildiği hız giriş basıncına bağlı olarak bu değerin oldukça üstüne çıkmaktadır. Bu nedenle türbin ve alternatörü aynı mil üzerinden bir kaplin vasıtası ile bağlamak yerine pinyon kullanmak veya daha yüksek hızlarda çalışabilecek bir alternatör tercih etmek uygun olabilir. Bu uygulama için şekilde görülen alternatörün seçilme sebebi ulaşabildiği güç değeridir. Malesef 2 kW'a yakın güç üreten ve daha yüksek devir hızlarında çalışabilecek başka bir alternatöre henüz ulaşamamıştır.

Yukarıda görülen bu alternatörün imal edilmesi de çok komplike bir çalışmayı gerektirdiğinden imalat yerine piyasada mevcut bir makineyi satın almak uygun bulunmuştur. Türbinin açısal hızı da bu nedenle sınırlanmaktadır. Türbinin ürettiği

tork değeri jeneratörün talebinin altında kalmakta ve dolayısı ile türbin jeneratörü belli bir hız değerine kadar tahrik edebilmektedir.

Bu değer boşta çalışırken 30000 rpm yük altında ise 16000 rpm civarındadır. Daha yüksek bir tork değerine ulaşmak amacı ile bir pinyon kullanmak, türbin çıkış devrini jeneratörün normal çalışma hızına yaklaştıracak ve türbinin de daha yüksek hızlarda çalışmasına olanak verecektir. Türbinin artan hıza bağlı olarak veriminin artması beklenmektedir. Bunun sebebi rotorun çalışma akışkanına göre bağlı hızının azalması ve aynı zamanda akışkanın rotor dairesi içinde oluşturması öngörülen spiralin buręu sayısının artmasına bağlı olarak akışkanın takip ettiği hidrolik yolun uzaması ve dolayısı ile rotora daha fazla enerji aktarılmasıdır.

Bu bölümde verilen resim ve fotoğraflar imalat maksatlı olmayıp, sadece yapılan çalışma hakkında görsel bir değerlendirme yapılabilmesi amacı ile paylaşılmıştır.

5. TESLA TÜRBİNİNİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

5.1 Ölçülecek Parametreler

Deneysel amaçlı üretilen türbinin bir güç üretici olarak sahip olduğu bir kaç ana parameter sayılabilir. Bunlar türbinin ürettiği güç, tork, RPM, hava tüketimi ve verim olarak sıralanılabilir. Bu değerler değişik giriş basınçları için deneysel olarak analiz edilecektir.

Türbinin ürettiği güç değeri kendi miline akuple jeneratörün gücünden faydalanılarak bulunacaktır. Bu güç değeri jeneratörün iki fazı arasındaki gerilimin ve bir fazı üzerinden geçen akımın ölçülmesi ile 5.1 numaralı eşitlikte verilen formül kullanılarak bulunmuştur. Bu hesaplamalar jeneratör fazları özdeş kabul edilerek yapılmıştır. Jeneratör çıkışı üç fazlı bir köprü diyot vasıtası ile doğrultulup aynı hat üzerinden kullanıldığı için fazlar arasındaki yüklenme farklılıkları bu sistemde ihmal edilebilir. Dolayısı ile fazlar özdeş kabul edilebilir.

$$P=1,33\sqrt{3}UI\cos\varphi \quad (5.1)$$

Yukarıda ki formülde P güç, U gerilim ve I akımı ifade etmektedir. Bu formülde ki $\cos\varphi$ değeri jeneratörün motor olarak kullanılması durumunda üretici tarafından maksimum %98 olarak verilmektedir. Bu değer motorun ürettiği aktif gücün görünür güce bölümünden elde edilen sayıdır. Burada $\cos\varphi$ değerini 1 kabul ederek hesaplamalar yapılmıştır. Reaktif kaybın ifadesi olan bu değer aslında jeneratöre verilen mekanik gücün ne kadarının aktif güce çevrildiğini gösterir. Bu kaybı ve diğer kayıpları ayrı ayrı hesaplamaktansa, jeneratörün reaktif kaybı ve türbin ile jeneratör arasında ki aktarma kayıpları toplamda %75 kabul edilerek hareket edilmiştir. Bundan dolayı jeneratörün ürettiği güç 1.33 ile çarpılarak türbinin mil gücü elde edilmiştir.

Tork değeri ise 5.2 numaralı eşitlikte gösterildiği gibi türbin milinden alınan güç değerinin açısal hıza bölünmesi ile elde edilmiştir.

$$\tau = \frac{P}{\omega} \Rightarrow \frac{P}{2\pi f} \quad (5.2)$$

Yukarıda ki eşitlikte τ tork, ω açısal hız ve f frekansı göstermektedir. Frekans değeri jeneratörün iki fazı arasından ölçülen gerilimin frekansıdır.

Türbin milinin dakikadaki devir sayısını veren RPM değeri ise 5.3 numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$N_{(rpm)} = \frac{f60}{n_p} = 10f \quad (5.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte n_p jeneratörün çift kutup sayısıdır. Jeneratör 6 çift kutuplu olduğundan gerilimin frekansının 10 katı RPM değerine eşittir.

Türbinin izentropik verimi ise 3.1 numaralı eşitlikten faydalanılarak bulunmuştur. 5.4 numaralı eşitlikte gösterilen şekilde verim hesaplanmıştır.

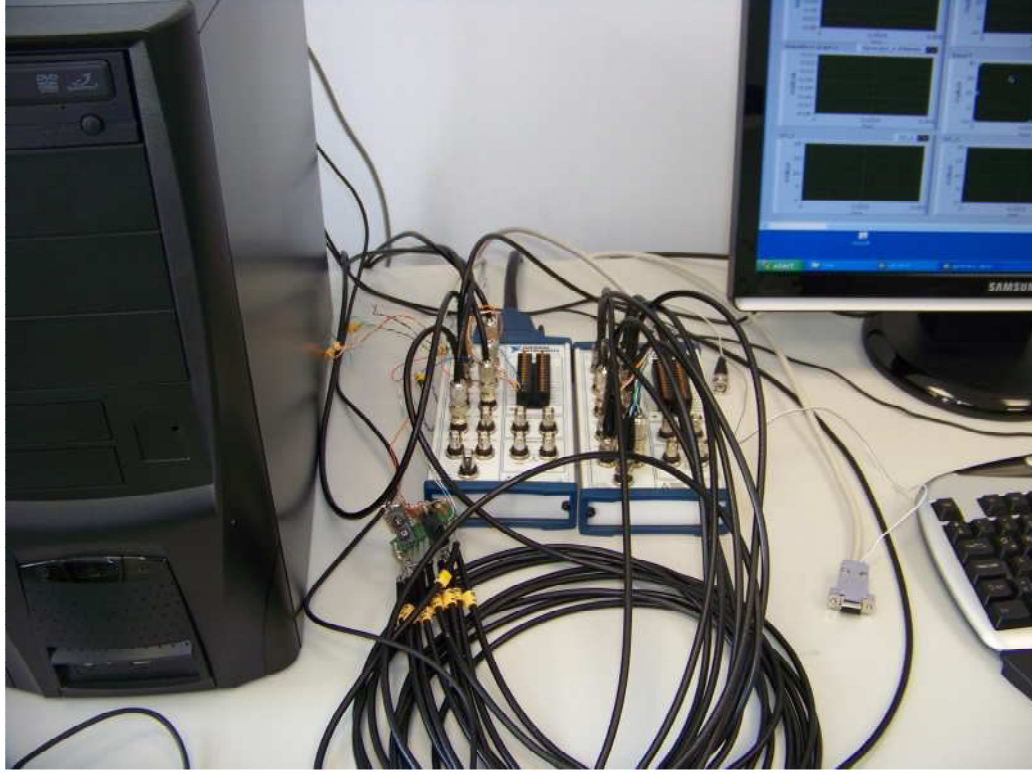
$$\eta_s = \frac{P}{\Delta h_s \dot{m}} = \frac{P}{\Delta h_s \dot{V}/v} = \frac{Pv}{\Delta h_s \dot{V}} \quad (5.4)$$

Çalışma akışkanının türbine giriş sıcaklığı, basıncı ve debisi elektronik akış kontrolörü ile ölçülmektedir. Türbin milinden alınan iş miktarının basınç ve sıcaklıktan yola çıkılarak termodinamik tablolardan bulunan entalpi farkının kütleli debi ile çarpımına bölünmesi ile izentropik verim değeri elde edilmektedir. Kütleli debi akışkanın giriş basıncındaki hacimsel debisinin özgül hacmine bölünmesi ile bulunmuştur. Bu hesaplamalarda türbinin mekanik kayıpları ihmal edilmiştir. Bundan dolayı türbin veriminin hesaplanan değerden biraz daha büyük olduğu söylenilebilir. Ölçüm sistemi ve takip edilen yöntemlerden sonra ki bölümde detaylı olarak bahsedilecektir.

5.2 Ölçüm Sistemi

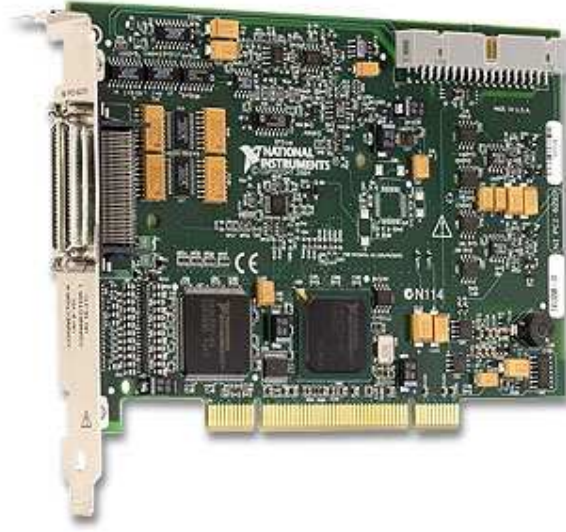
Türbinin karakterize edilebilmesi için jeneratörün iki fazı arasındaki gerilim, gerilim üzerinden frekans, frekans kullanılarak RPM, akım, çalışma akışkanının giriş basıncı, hacimsel debisi ve sıcaklığı ölçülmüştür.

Gerilim ve akım National Instruments firması tarafından üretilmiş olan bağlantı paneli üzerinden BNC kabloları kullanılarak aynı firmanın ürettiği PCI-6229 kodlu veri kartı vasıtası ile bilgisayara aktarılmış ve aynı firma tarafından üretilmiş olan Labview programında oluşturulan yazılım kullanılarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Oluşturulan ölçüm yazılımı ile gerilim ve akım değerleri kullanılarak hesaplanan güç ve üretilen gerilimin frekansı kullanılarak bulunan RPM değeri kaydedilen diğer büyüklüklerdir. Kullanılan BNC bağlantı paneli 5.1 numaralı şekilde görülmektedir.



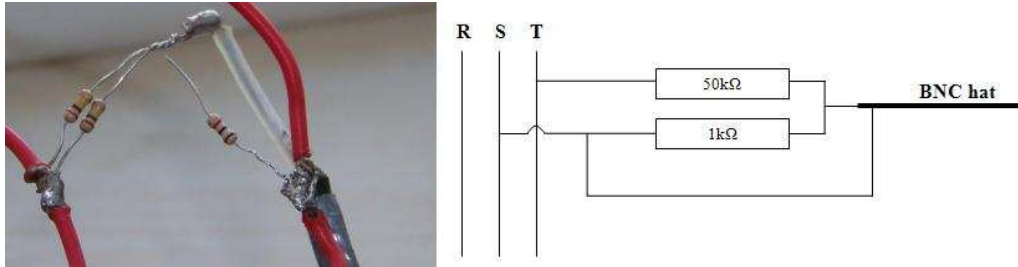
Şekil 5.1 : Veri toplamada kullanılan NI BNC 2210 bağlantı panelleri.

Toplanan veriler yukarıda görülen bağlantı paneli yardımı ile NI PCI-6229 veri toplama kartına girilmektedir. Bu kart 250 kS/s örnekleme imkanı vermektedir. Bu örnekleme hızı kartın toplamda sahip olduğu örnekleme hızıdır. Kanal sayısının artışına bağlı olarak her bir kanala eşit bölünmek üzere örnekleme frekansı azalmaktadır. Örneğin 10 kanaldan veri toplanılması durumunda kanal başına maksimum örnekleme frekansı 25 kS/s olmaktadır. Bunun anlamı ihtiyaç duyulan kanal sayısının artışı ile birlikte toplanan verilerin hassasiyetinin azalacağıdır. Kullanılan veri toplama kartı 5.2 numaralı şekilde görülmektedir. Bu kart kullanılarak tek kanal üzerinden 125 kS/s çözünürlüğünde veri toplanabilmektedir. Fakat toplanan verilerin kalitesinin ve güvenilirliğinin yüksek olabilmesi açısından örnekleme frekansının yani birim zamanda toplanılan veri sayısının okunan sinyalin frekansının mümkün olduğunca üzerinde olması gerekmektedir. Bu nedenle burada kullanılan veri toplama kartının kapasitesi örneklenmek istenilen sinyallerin belli bir frekans değerinden sonra düzgün örneklenebilmesine olanak vermemektedir. Bu nedenle ileride yapılması planlanan uygulamalarda kullanılmak üzere daha yüksek kapasiteli bir veri toplama kartı edinilmesi planlanmaktadır.



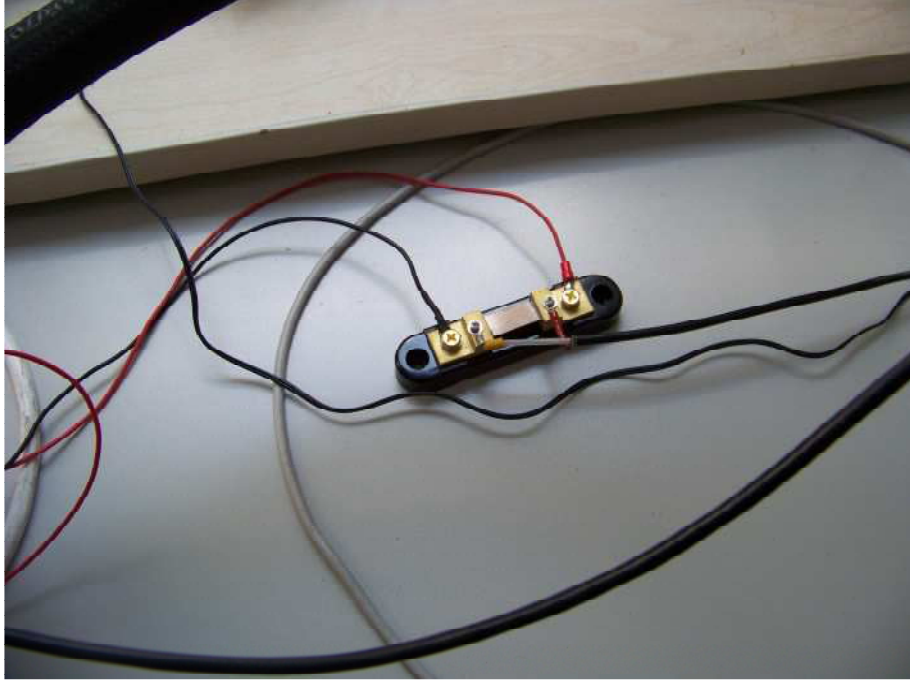
Şekil 5.2 : NI PCI-6229 Veri toplama kartı.

Veri toplama kartının gerilim giriş limiti üretici tarafından 10 Volt olarak verilmektedir. Bu nedenle alternatör tarafından üretilen gerilimin bir gerilim bölücü vasıtası ile veri toplama kartına girilmesi gerekmektedir. Bu sebeple 50 ve 1 kilo ohm değerindeki dirençlerle alternatörün iki çıkış fazı arasında bir gerilim bölücü oluşturulmuştur. Kullanılan gerilim bölücünün fotoğrafı ve şematik gösterimi 5.3 numaralı şekilde görülmektedir.



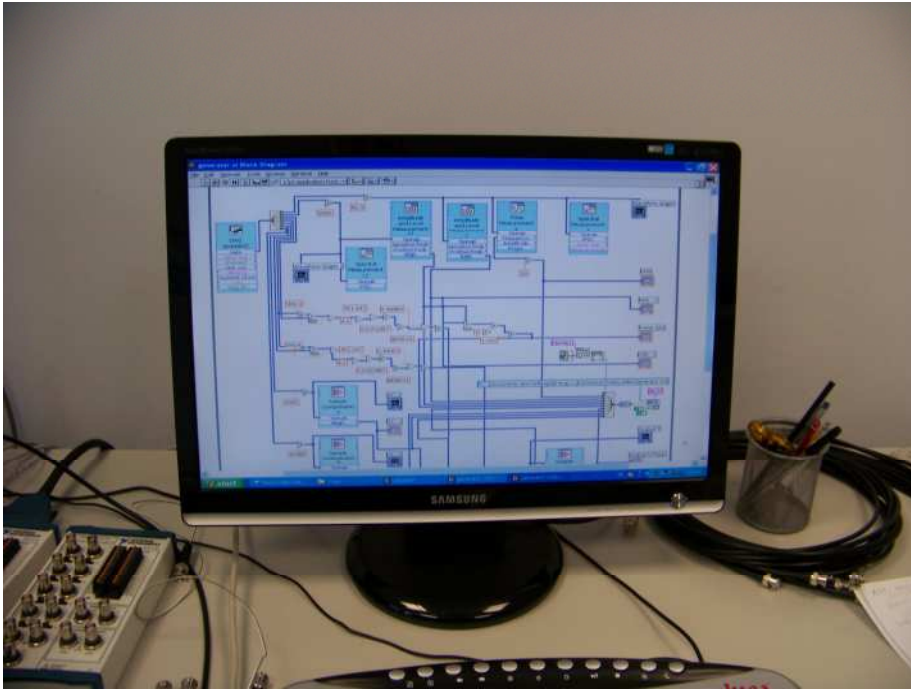
Şekil 5.3 : Gerilimin okunması amacı ile oluşturulan gerilim bölücü.

Akım değeri ise 1 miliohm değerinde bir şönt direnç kullanılarak ölçülmüştür. Bu şönt direnç alternatörün bir fazına seri bağlanmış ve BNC kablunun uçları şönt direncin iki ucuna bağlanarak şönt üzerinde oluşan gerilim değeri ölçülmüştür. Şönt direncin üzerinden geçen her bir Amper akıma karşılık 1 mV gerilim oluşacağından okunan gerilim değerinin bin katı faz üzerinden geçen akım değerine eşittir. Uçlarına BNC kablolar bağlanmış olan şönt direnç 5.4 numaralı şekilde görülmektedir.



Şekil 5.4 : Akım ölçümü amacı ile kullanılan şönt direnç ve BNC bağlantısı.

Alınan bu verilerin işlendiği yazılımın blok diyagramının bir bölümü 5.5 numaralı şekilde verilmektedir.



Şekil 5.5 : Labview programında oluşturulan veri toplama ve işleme yazılımı.

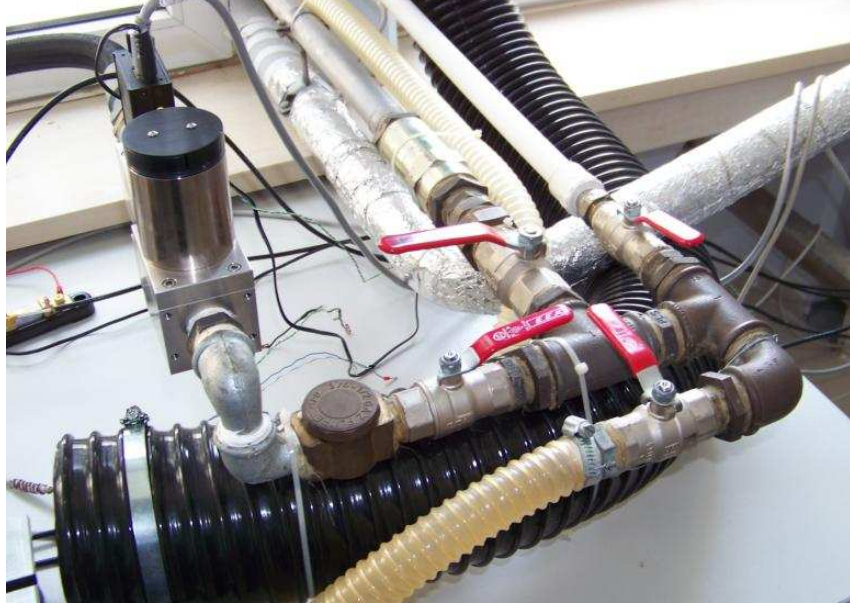
Yukarıdaki şekilde gösterilen yazılım ilk olarak oluşturulan yazılımdır. Daha sonra oluşan gerekliliklere göre tekrar düzenlenmiş ve farklı şekillerde faydalanılmıştır. Bu yazılımın okuduğu verilerin takip edildiği göstergelerin bulunduğu ön panele ait fotoğraf 5.6 numaralı şekilde verilmektedir.



Şekil 5.6 : 5.5 numaralı şekilde verilen yazılımın ön paneline ait fotoğraf.

Sistemin çalışma akışkanına ait verileri toplamak amacı ile Alicat Scientific firması tarafından üretilmiş olan debi kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 1500 lt/dak değerine kadar hassas debi, 8,6 Bar değerine kadar basınç, ve 263, 323 K aralığında sıcaklık ölçümü yapabilme özelliğine sahiptir. KGYS sistemi bir güç yedekleme ve üretim sistemidir. Sistemin kriyojenik depolama tankının maksimum basıncının 38-40 Bar olduğu göz önüne alındığında debi kontrolörünün sistemi ne ölçüde sınırladığı daha rahat anlaşılacaktır. Bu tür bir debi kontrolörünün bu sistemde kullanılması uygun değildir. Sistemin ihtiyaç duyduğu hassasiyet düzeyi düşük fakat debi ve özellikle çalışma basıncı aralığı büyük olmalıdır. Alicat Scientific firmasının debi control cihazı daha çok kütle oranının çok hassas şekilde ayarlanması gereken uygulamalarda kullanılmak üzere imal edilmiştir. Örneğin gazlaştırma reaktörlerinde reaktör içindeki ortamın ihtiva ettiği oksijen miktarının çok düşük olması gerekmektedir. Bu gibi uygulamalarda hassasiyeti yüksek olan debi kontrol cihazlarına ihtiyaç vardır. Fakat KGYS’de yüksek basınca dayanıklı bir oransal

kontrol valfi ve bu valfe geri besleme yapacak bir basınç sensörü ile basınca dayanıklı bir debi ölçer kullanılması daha uygun olacaktır. Sistemin geliştirilmesi kararı alınması durumunda sonraki uygulamalarda sistemin yüksek basınçta çalışmasını mümkün kılacak ekipmanlar kullanılmalıdır. Bazı mecburiyetlerden dolayı Alicat Scientific firmasına ait debi kontrol cihazı kullanılmak zorunda kalınmıştır. Kullanılan bu cihaz ve cihaz öncesi dağıtım sistemi 5.7 numaralı şekilde görülmektedir.



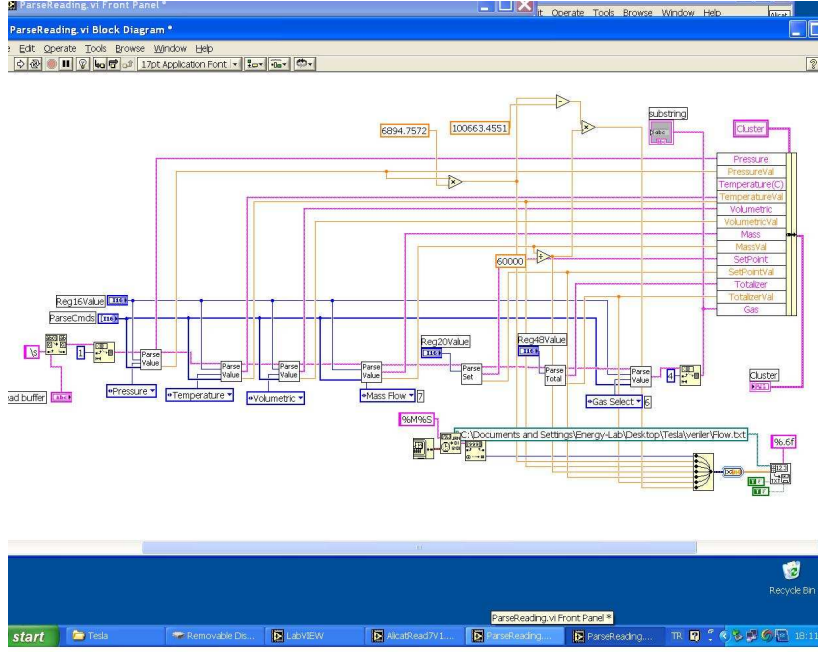
Şekil 5.7 : Debi kontrolörü öncesi yapılan bağlantılar, egzoz ve tahliye hatları.

Bu cihazın kendine ait ekranı ise 5.8 numaralı şekilde görülmektedir.



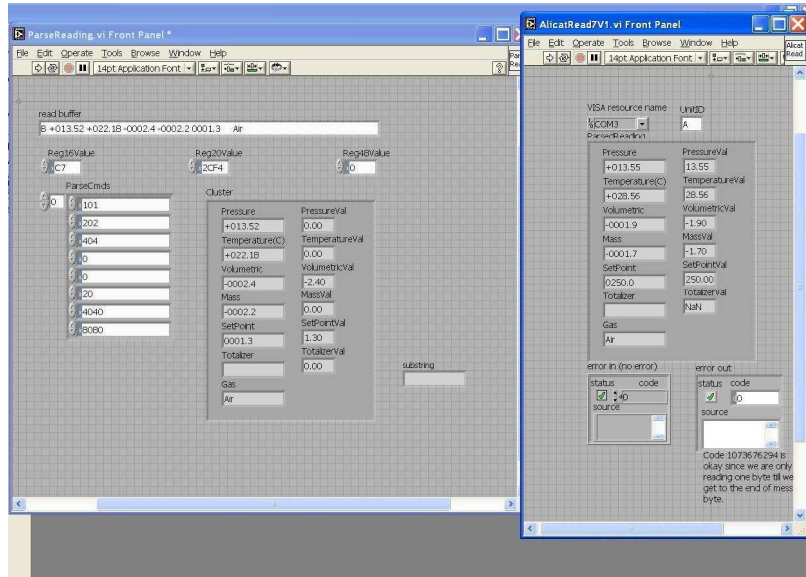
Şekil 5.8 : Debi kontrolörünün önden görünüşü.

Debi kontrolörüne ait verilerde eş zamanlı olarak labview yazılımı vasıtası ile okunmaktadır. Cihazın verilerinin bilgisayara kaydedilmesi amacı ile oluşturulan labview yazılımına ait blok diyagram 5.9 numaralı şekilde görülmektedir.



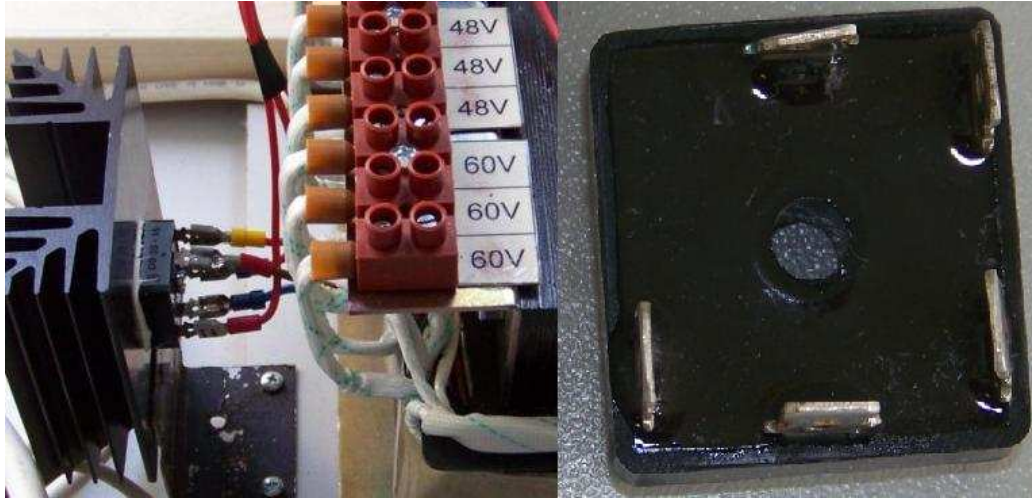
Şekil 5.9 : Debi kontrolörü verilerini toplayan yazılıma ait blok diyagram.

Bu yazılıma ait ön panel ise 5.10 numaralı şekilde verilmektedir. Bu cihaz RS-232 portu üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır.



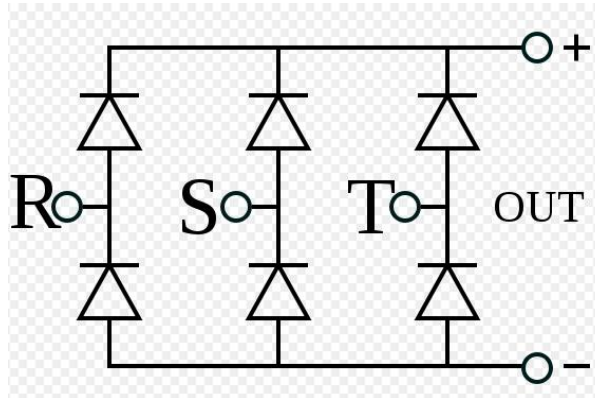
Şekil 5.10 : Şekil 5.9’da verilen ölçüm yazılımının ön paneli.

TT tarafından tahrik edilen yüksek frekanslı alternatörün ürettiği yüksek frekanslı gerilim çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Üretilen bu akım bir transformator kullanılarak 24, 36, 48, 60 ve 72 volt değerlerin e çevrilebilmektedir. Lamba ve benzeri saf direnç elemanlar sözkonusu olduğunda yüksek frekansın kullanılması sorun yaratmamaktadır. Diğer taraftan türbinin karakterizasyonu amacı ile üretilen alternatif akım üç fazlı bir köprü diyot vasıtası ile doğrultulmuş ve elektronik DC yük kullanılarak tüketilmiştir. Kullanılan köprü doğrultucunun alternatör çıkışına bağlanmış ve tekil haldeki fotoğrafı 5.11 numaralı şekilde verilmiştir.



Şekil 5.11 : Gerilimin doğrultulmasında kullanılan köprü doğrultucu.

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi köprü doğrultucu transformator ile aynı tabla üzerine, aşırı ısınmasını engellemek için bir ısı değiştiricisi üzerine monte edildikten sonra sabitlenmiştir. Kullanılan köprü doğrultucunun şematik gösterimi ise 5.12 nolu şekilde verilmiştir.



Şekil 5.12 : Kullanılan köprü doğrultucunun şematik gösterimi[32].

Alternatörün ürettiği yüksek frekanslı gerilim doğrultulduktan sonra Elektro-Aomatik firması tarafından üretilmiş olan 9080-200 model numaralı elektronik DC yüke girilmiştir. Bu cihazın maksimum giriş gerilimi 80 Volt, maksimum akım sınırı ise 200 Amper olarak verilmektedir. Cihazın anlık tüketebileceği maksimum güç, 2400 Watt, 15 °C sıcaklıkta daimi çalışma halinde tüketebileceği güç ise 1500 Watt olarak verilmektedir[22]. Bu cihaz 5.13 numaralı şekilde görülmektedir.



Şekil 5.13 : Elektro-Aomatik EL 9080-200 elektronik DC yük.

Şekil 5.13'te gösterilen elektronik DC yükün; sabit güç, sabit gerilim, sabit akım, sabit direnç gibi modları bulunmaktadır. Sayılan bu büyüklükler isteğe göre değişken veya sabit olarak kullanılabilir. Alternatörün dolayısı ile türbinin ürettiği gücü görsel olarak ortaya koyabilmek amacı ile 50 Volt gerilim, 60 Watt güç değerine sahip 25 adet lamba kullanılarak bir pano oluşturulmuştur. Bu pano 5.14 numaralı şekilde görülmektedir. Debi kontrolörünün maksimum çalışma basıncı 8.6 Bar olduğundan gazlaştırılmış azot, debi kontrolörü devreden çıkarılarak kullanılmıştır. Basıncı azot akışı kriyjenik eşanjör öncesinde ki küresel vana ile manuel olarak kontrol edilmiştir. Kriyjenik tanktan azotun çıkış basıncı 30 Bardan düşük olmadığı için küresel valf çok yavaş açılarak TT çalıştırılmıştır. 7 turda tam açılan valf yaklaşık 1.5 tur açılarak 2 kW güç üretilmiş ve 5.14 numaralı panoda görülen bütün lambalar çalıştırılmıştır.



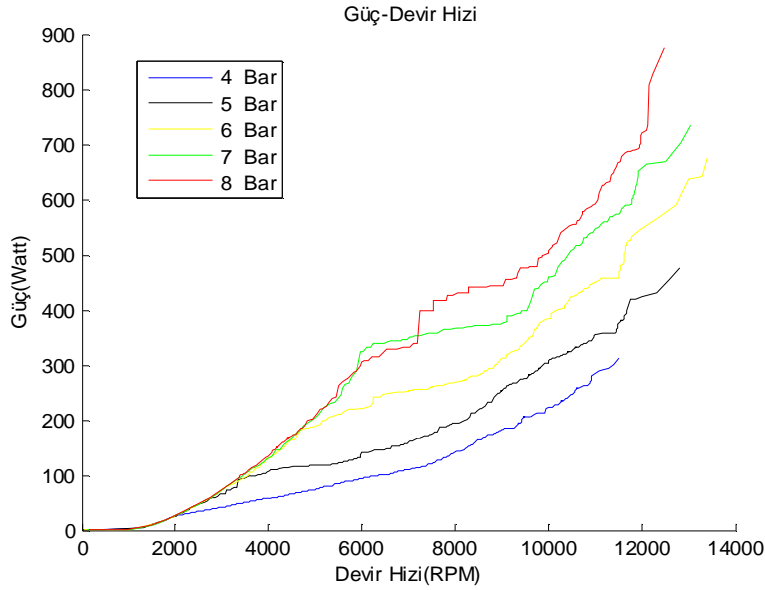
Şekil 5.14 : Üretilen gücü göstermek amacı ile lambalarla yapılan pano.

Ölçüm sisteminde kullanılan ekipmanlar genel olarak yukarıdakilerdir. Bunların haricinde sistemin termoelektrik jeneratör ve kriyojenik ısı değiştirici bölümlerinde rezistans termometreler(PT-100) kullanılmıştır. Bu elemanlar kriyojenik sıcaklıklarda ölçüm yapabilmek için kullanılmışlardır. PT-100 elemanlarının sıcaklığa bağlı değişen direnç değerlerine ait bir fonksiyonları vardır. Bu fonksiyon kullanılarak ve kurulan devre yardımı ile 5 V sabit gerilim uygulanan durumda PT-100 elemanı üzerinden geçen akım bir kilo ohm değerinde ki şönt direnç üzerinden eşzamanlı ölçülerek bulunan direnç değerinden sıcaklık hesaplaması yöntemi ile 77 K civarına kadar düşen sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

5.3 Yapılan Ölçümlere Ait Sonuç ve Grafikler

TT'ne ait güç-açılal hız, tork-açılal hız, güç-izentropik verim ve güç-hacimsel debi grafiklerini oluşturabilmek için ölçümler yapılmıştır. Elektronik DC yük kullanılarak direnç değeri sıfırdan başlanılarak yaklaşık 0,1 Ω aralıklarla artırılmış ve böylece artan dirence bağlı olarak alternatörün ürettiği çıkış gerilimi ve dolayısı ile açılal hız değeri artırılmıştır. Böylece türbinin seçilen basınç değerinde hangi devirde ne kadar güç ve tork ürettiği bulunmuştur. Bu değerlere karşılık gelen hacimsel azot debisi ve izentropik verim hesaplanmıştır. Ölçülen değerler Matlab programı kullanılarak düzenlenmiş ve sözü edilen grafikler oluşturulmuştur. Veri ölçüm sisteminden kaynaklanan ve imkanlar dahilinde henüz çözülememiş olan bir sorun nedeni ile veriler yaklaşık 1400 Hz frekans değerine kadar düzgün alınmakta fakat bu değerden sonraki veriler tutarsız hale gelmektedir. Bu nedenle oluşturulan grafikler alternatörün seçilen basınç değerinde yüksüz ve maksimum yük değerlerini tarayacak şekilde olmamaktadır. Diğer taraftan; ölçülen büyüklükler, garfikler ve grafiklerin

taradığı açısal hız bölgeleri, TT'nin karakteristik davranışlarını anlayabilmek açısından yeterlidir. Güç-açısal hız grafiği 5.15 numaralı şekilde verilmektedir. Grafiklerin oluşturulmasında faydalanılan bütün verilerde azotun giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 280 K'dir. Hesaplar belirtilen basınç değerleri ve bu giriş sıcaklığı için yapılmıştır.

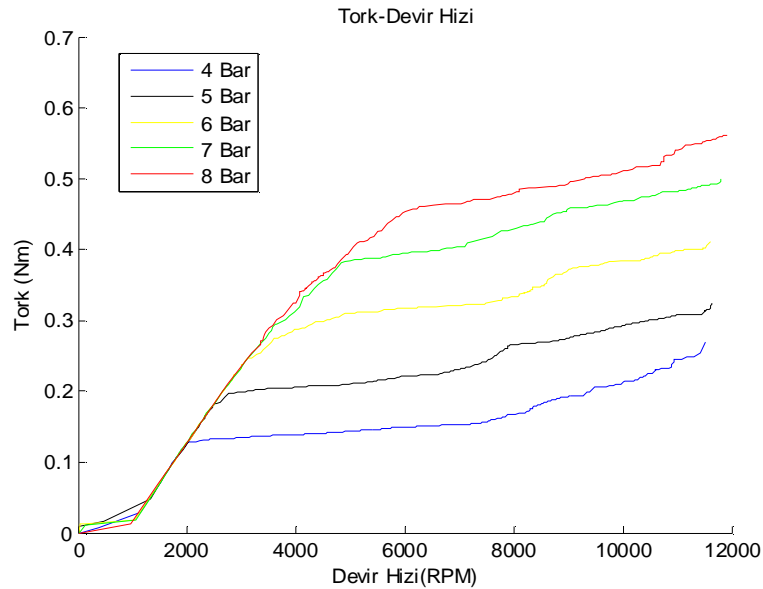


Şekil 5.15 : TT'ne ait güç-RPM grafiği.

Grafikte farklı renklerle çizilen eğriler farklı basınç değerlerinde alınmıştır. Basınç değerleri sırası ile 4,5,6,7 ve 8 Bar'dır. Verilen grafikler ölçüm sisteminin bazı zaafiyetleri nedeni belli bir aralıkta kalmaktadır. Alternatör çıkışından alınan gerilim ve akım değerlerine ait sinyallerin 14000 RPM, başka bir deyişle 1.4 kHz frekansından sonra bozulması söz konusudur. Diğer taraftan bu çözünürlük değerlerinde elde edilen grafikler de TT'nin karakteristik özelliklerini ortaya koyması açısından oldukça tutarlıdır. Kullanılan alternatörü üreten firmadan, alternatörün teknik özellikleri konusunda bilgi edinilmiş olmasına karşın alternatörün verilen çalışma hızı sınırları dışında nasıl bir davranış göstereceği konusunda bilgi elde edilememiştir. Alternatörün aslında 3 fazlı bir motor görevi göreceği şekilde imal edildiği göz önünde bulundurulduğunda ve bu motorun maksimum devir hızının 11000 RPM olduğu düşünüldüğünde alternatöründe limitlerinin zorlandığı görülmektedir. 5.15 numaralı şekilde verilen güç-devir hızı grafiği, teorik olarak öngörüldüğü şekilde artan basınca ve dolayısı ile giriş hızına bağlı olarak üretilen gücün artacağını göstermektedir. Farklı basınçları temsil eden eğrilerin belli bir

noktaya kadar neredeyse aynı yolu takip etmesinin sebebi ise alternatörün talep ettiği torkun aynı güç-devir hızı oranında sağlanamamasıdır. Alternatör, şekil 5.13'te gösterilen elektronik DC yük üzerinden değişken direnç kullanılarak yüklenmektedir. Başlangıçta direnç 0 (kısa devre durumu) seçilerek alternatörden maksimum akım talep edilmesi yani TT milinin mümkün olan en yüksek kuvvetle frenlemesi yapılmış, ardından direnç değeri artırılarak (akım talebi düşürülerek) türbinin hızlanmasına ve dolayısı ile gerilim üretmesine izin verilmiştir. Bu şekilde, artan devir hızına bağlı olarak alternatör gerilim ve dolayısı ile güç üretmeye başlamıştır. Belli bir devir hızı yani güç talebi değerine kadar TT'nin ürettiği tork gerekli olan toplam tork talebini (alternatörün talebi ve mekanik kayıplar nedeni ile ortaya çıkan talep) karşılamaktadır. Fakat üretilen torkun talebi karşılayamaz hale geldiği noktadan itibaren TT bayılmaya (güç-devir hızı eğrisinin eğimi azalmakta) başlamaktadır. Açık şekilde anlatıldığı üzere şekil 5.15'te gösterilen grafik, alternatörün çalışma sınırları içerisinde türbinin davranışını ortaya koymaktadır. Dolayısı ile KGYS'nin daha gelişmiş bir ana güç üretim entegre birimine sahip olana kadar kullanacağı türbin-alternatör çiftinin güç-devir hızı karakteristiği ortaya konulmuştur.

TT'ne ait tork-açısıl hız grafiği ise 5.16 numaralı şekilde verilmektedir.

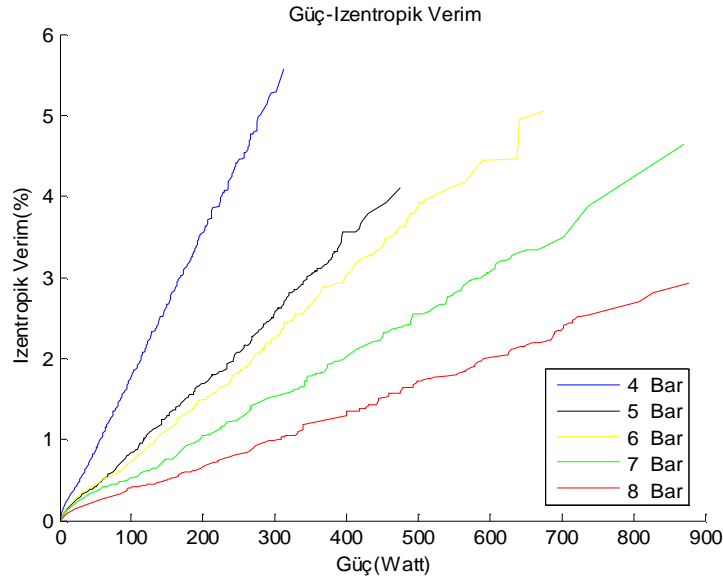


Şekil 5.16 : TT'ne ait tork-RPM grafiği.

Yukarıda 5.16 numaralı şekilde verilen tork-RPM grafiğinden anlaşılan başlıca husus, değişen giriş basıncı değerlerine bağlı olmaksızın alternatörün talep ettiği

torku(akım talebine bağılı olarak artmaktadır) TT'nin belli bir noktaya kadar karşılayabildiğı fakat bu noktadan sonra TT şayet hızlanmasına izin verilmezse torku karşılayamamaktadır. Bu durum üretilen torkun devir hızına bağılı artışının grafikte açık şekilde görülen noktalardan sonra çok net şekilde azaldığını ve devir hızına bağılı artışının çok yavaş şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

TT'ne ait güç-izentropik verim grafiğı 5.17 numaralı şekilde verilmektedir.

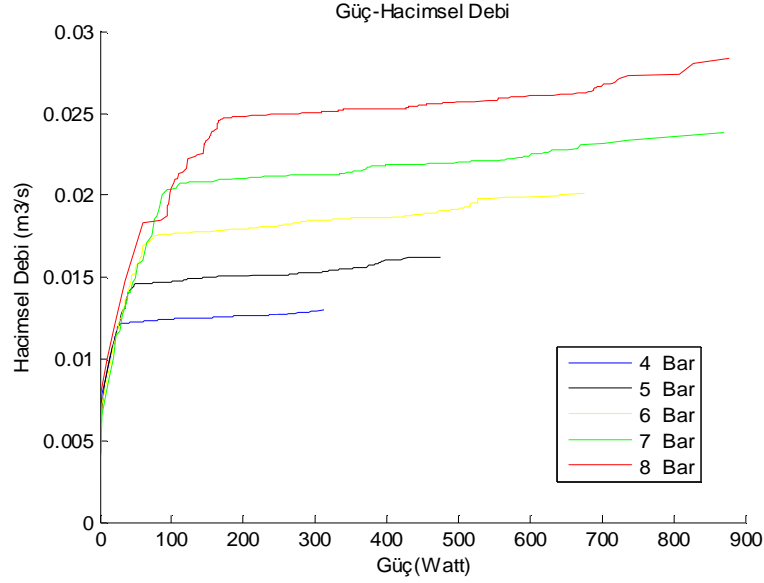


Şekil 5.17 : TT'ne ait Güç-İzentropik verim grafiğı.

Güç-verim grafiğıne bakıldığında ise en yüksek verim değerinin en düşük basınçta alınan verilere ait olduğu görülmektedir. Bunun sebebi düşük giriş hızına bağılı olarak sınır tabaka kalınlığının nispeten büyük olması ve diğer eğrilerde de görüldüğü gibi TT'nin hızlanması ile beraber bağılı hızın da azalması sebebi ile sınır tabaka kalınlığının artışı ve akış yolunun uzamasına bağılı olarak artan basınç düşümüdür.

Daha açık şekilde ifade edilecek olursa akışkanın disklere göre bağılı hızının düşük olması disklerin yüzeyinde oluşan sınır tabakanın kalınlığını azaltmaktadır. Bir akış kanalının her iki tarafında da disk yüzeyi olduğundan bahsedilen bu kalınlığın azalması diskler arasında kalan boş hacmin akışkana direnç göstermeyerek akışkanın türbini iş görmeden terk etmesine izin vermesi anlamına gelmektedir.

TT'ne ait güç-hacimsel debi grafiğı ise şekil 5.18'de verilmektedir.



Şekil 5.18 : TT'ne ait Güç-Hacimsel debi grafiği.

Teorik olarak TT türbininin kalkıştan belli bir hıza ulaşıncaya dek türbülanslı akışla çalışacağı öngörülmektedir. Yukarıda 5.18 numaralı şekilde verilen grafik türbülanslı bölgeden çıkılana kadar TT'nin akışa daha fazla direnç gösterdiğini fakat belli bir noktadan akışın laminara yaklaşması ile debinin stabil hale geldiğini düşündürmektedir.

5.4 Türbinin Ölçüm Sonuçlarına Göre Genel Değerlendirmesi

Türbinin ürettiği güç basınç değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu durum, basıncın artışına bağlı olarak giriş entalpisi ve dolayısı ile giriş hızının artması beklendiğinden beklenen bir sonuçtur. Türbinin alternatör limitlerinde öngörülen gücü rahatlıkla üretebildiği yapılan denemelerle görülmüş fakat sistemde ki ölçüm elemanları belli bir basınç ve frekansın üzerinde yetersiz hale geldiğinden bahsedilen bu güç değerleri sadece görsel olarak ortaya konabilmiştir. Farklı basınç değerleri için alınan üretilen gücün devir hızına bağlı olarak çizildiği eğriler belli bir noktaya kadar hemen hemen aynı yolu takip etmekte fakat sonra yüksek basınç değerinde çizilen eğriler ayrılmaya başlamaktadır. Bu durumdan TT'nin rotoruna aktarılan gücün açılal hızın artışına bağlı olarak arttığı sonucu çıkarılabilir. Teorik olarak beklenen şey, açılal hızın artışına bağlı olarak türbin rotor diskleri arasından akan akışkanın takip ettiği yolun bir spiral şekline yaklaşması ve dolayısı ile kat ettiği mesafenin(2.19 numaralı eşitlikte L simgesi ile belirtilmiştir) artışına bağlı olarak

aktardığı gücünde artmasıdır. Güç üretimi amacı ile kullanılan bu tür makinelere ait eğriler makinenin bilinen bir basınç ve sıcaklık değerinde hangi devirde ne kadar güç, tork vs. üreteceğini önceden belirleyebilmek amacı ile kullanılırlar. Grafikler toplanan verilerin salt haliyle oluşturulmuş eğrilerden meydana getirilmiştir. Eğrilerin okunmasını kolaylaştırmak maksadı ile fonksiyon uydurmak bir yöntem olarak görülebilir fakat eğrilerin bu hali de oldukça nettir.

TT'ne ait tork-açısız hız grafiğine baktığımızda ise üretilen torkun devir hızına bağlı artışının belirli bir noktaya kadar hızlı bir şekilde arttığı daha sonra ise bu artış hızının net bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi türbinin ürettiği tork çıktısının belli bir noktadan sonra devir hızının artışı oranında artmadığı, yani türbinin alternatörün tork talebini ancak devir hızının artışı ile karşılayabildiğidir.

Üçüncü sıradaki güç-izentropik verim grafiğine baktığımızda ise düşük basınç değerlerinde aynı güç değeri için düşük basınçta ki çalışmanın daha verimli olduğu görülmektedir. Bu durum basit olarak yüksek basınç değerlerinde dolayısı ile yüksek hızlarda çalışma akışkanının TT'ni daha az iş yaparak terk ettiği anlamına gelmektedir. Basıncın artışına bağlı olarak ortaya çıkan bu verim düşümü 2.19 numaralı eşitlikte ki f ile ifade edilen sürtünme faktörünün açık hali yazılarak(bkz. eşitlik 5.5) daha rahat açıklanabilir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \Rightarrow \frac{64\mu}{\rho V D} \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (5.5)$$

$$= \frac{64\mu L V}{2D^2}$$

Yukarıda 5.5 numaralı eşitlikte verilen 2.19 numaralı eşitliğin açık haline bakıldığında; sürtünmeye bağlı basınç düşümünün, artan basınç nedeni ile artan hıza bağlı olarak yükselmesi gerektiği düşünülebilir. Fakat artan hızla birlikte sınır tabaka kalınlığı da azalmakta ve dolayısı ile aynı büyüklükte ki disk aralığı için serbest akış bölgesi genişlemektedir. Bu da düşük açısız hıza bağlı olarak çalışma akışkanının çok daha kısa bir yoldan TT egzozuna ulaşacağı ve serbest akış bölgesinin artan hıza bağlı olarak genişlemesi sebebi ile çalışma akışkanının büyük bir kısmının iş görmeden egzoz edileceği anlamına gelmektedir. Diğer taraftan rotor diskleri ile çalışma akışkanı arasındaki bağıl hız değeri ne kadar düşerse, yani rotor diskleri ne kadar hızlı dönerse sürtünme faktörü de aynı oranda büyüyecektir. İşte bu nedenle 5.17 numaralı şekilde görülen eğrilerden eğimi en büyük olan 4 Bar basıncına ait olandır. Basıncın artışına bağlı olarak verimin düşmesini engellemek için izlenebilecek bazı yöntemlerden bahsetmek gerekirse; bunlar yüksek basınç değerleri

için disk aralık mesafesini düşürmek, rotor disk çapını büyütmek veya türbini mümkün olan en yüksek hız ve en düşük tork talebinde çalıştırmaktır. Deneysel amaçlı üretilen TT'nde disk çapı ve disk aralıkları basıncın artışına bağlı olarak değiştirilemediğinden, uygulanabilecek tek seçenek türbini mümkün olan en yüksek hızda ve düşük frenleme ile çalıştırmaktır. Bu da bir alternatör için yüksek frekans, yüksek gerilim ve düşük akım anlamına gelmektedir. Zaten güç-verim grafiğinde de elektronik yük kullanılarak arttırılan dirence bağlı olarak devir hızı yani frekans ve gerilim artmakta, devreden geçen akım ise göreceli olarak azalmaktadır.

Son olarak 5.18 numaralı şekilde verilen güç-hacimsel debi grafiğine baktığımızda, her farklı basınç değeri için hacimsel debinin belirli bir güç değerinden sonra hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Bunun anlamı türbinin belli bir açısal hıza ulaşıncaya dek akışkana direnç gösterdiği ve sonrasında açısal hızın artışına bağlı olarak üretilen güç artsa dahi debinin ciddi anlamda değişmediğidir. Debi aynı zamanda basınca bağlı olarak değiştiğinden basınçta meydana gelen dalgalanmalardan da etkilenmektedir. Bu nedenle grafikte görülen eğrilerin küçük bölgesel salınımları normal kabul edilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma bir sadece bir Tesla Türbini tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu çalışması değil aynı zamanda yeni bir güç yedekleme sistemi oluşturmak üzere yürütülmekte olan bir araştırma ve geliştirme çalışmasıdır. Çalışma kapsamında, İTÜ Enerji Enstitüsü bünyesinde, Kriyojenik Teknolojiler Laboratuvarı ve Veri İşleme ve Analiz Laboratuvarı adları altında iki yeni laboratuvar kurulmuş ve bu alanların genel düzenlemeleri yapılmıştır. KGYS'nin prototipinin oluşturulması amacı ile çeşitli imalatçılar ve tedarikçiler ile irtibat kurulmuş bir çok yeni yeni ekipman edinilmiş, üretilmiş ve denenmiştir.

KGYS'nin kriyojen depolama ünitesi ile ilgili araştırmalar ve çalışmalar yapılmış depolama ünitesinin üretim süreci boyunca imalatçı ile eşgüdüm içinde çalışılmıştır. Kriyojen depolama konusunda yapılan bu çalışmalar, kriyojenik uygulamalarla alakalı çok değerli bilgi ve tecrübelerin kazanılmasını sağlamıştır. Kriyojenik sıcaklıkların malzemeler ve ortamlarda oluşturduğu etkiler, kriyojenlerin belli sıcaklık bölgelerinde gösterdikleri ilginç davranışlar, yüksek performanslı ısı yalıtım teknikleri konusunda edinilen bilgi ve tecrübeler bahsedilen kazanımlardan sadece bazılarıdır. Bu çalışmalar kapsamında, KGYS'nin enerji üretimi yapan bölümlerinden biri olan TEG grubu ile ilgili çalışmalar yürütülmüş, bu çalışmalar kapsamında termoelektrik jeneratör uygulamalarının nasıl yapılması gerektiği ve bu uygulamalarda dikkat edilmesi gereken hususlara ait önemli bilgi ve tecrübeler kazanılmıştır. Bu uygulama kapsamında termoelektrik jeneratörler kriyojenik sıcaklıklarda test edilmiş ve normal ortam sıcaklıklarında gösterdikleri davranışlarla kıyaslama şansı bulunmuştur. Ayrıca kriyojenik ısı değiştiricisi üzerinde denenilen TEG modüllerinin optimal çalışabilmesi hususunda tecrübeler kazanılmıştır.

Sistemin takip edilebilmesi ve değerlendirilebilmesi amacı ile yapılan veri toplama sistemi çalışmaları kapsamında veri işleme ve analizi konusunda değerli bilgi ve tecrübeler kazanılmıştır. Çalışmalar kapsamında Labview programından faydalanılmış ve bu programın kullanımı konusunda tecrübe edinilmiştir. Ayrıca veri aktarımı ve algılama konusunda çalışılmış, ileride yapılması planlanan çalışmalara temel teşkil edecek bilgilerin yanında pratik bir çok deneyim elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında bu tez çalışmasının da esas konusunu oluşturan bir Tesla Türbini tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Yapılan bu çalışma başlı başına bir imalat projesidir ve imalatçı ile tasarıma ait detaylar paylaşıldıktan sonra, imalathanede yapılan çalışmalar tasarımcı yönetiminde yürütülmüş ve tamamlanmıştır. Yapılan tez çalışmasının sadece bu kısmında bile bir çok önemli çözüm ve kazanım sağlanmıştır. Yüksek devirli bir makinenin imalatı, sorunsuz çalıştırılması, ürettiği mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi bu kazanımlardan bazılarıdır. Üretilen Tesla Türbini İTÜ Enerji Enstitüsü kriyojenik teknolojiler laboratuvarına bağışlanmış ve deneysel kullanıma sunulmuştur. Kriyojenik teknolojiler laboratuvarında bulunan bu türbin deneysel ve gösterim amaçlı olarak defalarca çalıştırılmış ve halen ilk günkü gibi çalışabilir vaziyettedir.

TT'nin karakterizasyon çalışmaları sonucunda, ölçüm sonuçlarının yorumlanması ile birlikte bahsedilen bilgiler elde edilmiş ve bu bilgiler ışığında ileride yapılması düşünülen türbin geliştirme çalışmalarında takip edilecek yöntemler ve uygulamalarda izlenilecek yolun netleşmesini sağlamıştır. Örneğin, TT'nin yüksek devirlerde verim değerinin artacağı, yüksek hızlarda disk aralık mesafesinin küçültülmesi gerekliliği, türbin nozulunda sağlanan genişlemenin izentropik veriminin yüksek olmasına duyulan ihtiyaç doğrulanmıştır.

Mevcut öngörüler doğrultusunda KGYS'nin geliştirilmesine devam edilecek ve bu geliştirme çalışması kapsamında daha yüksek verimli türbinler yapılmasına çalışılacaktır. Örneğin; yatak sürtünmesinin azaltılması için manyetik yataklama gibi çözümlere gidilmesi, malzeme kullanımını azaltmak ve etkinliği arttırmak maksadı ile daha yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımına dair yöntemler geliştirilmesi, TT'nin daha yüksek devirlerde çalışmasına olanak sağlayacak yüksek düşürme oranlı ve düşük tork girişli redüktörler kullanılması, edinilen tecrübeler ışığında izlenilmesi planlanan yöntemlerden başlıcalarıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Barron, Randall. F.**, 1999. **Cryogenic Heat Transfer**. Taylor & Francis, UK
- [2] **Weisend II, J. G.**, 1998. **Handbook of Cryogenic Engineering**. Taylor & Francis, USA.
- [3] **Zhang N., Lior N.** 2007. A novel Brayton cycle with the integration of liquid hydrogen cryogenic exergy utilization. **Chinese Academy of Sciences, Beijing, University of Pennsylvania**, Philadelphia USA.
- [4] **Szargut J., S. Ireneusz** 2009. Utilization of the Cryogenic Exergy of Liquid Natural Gas(LNG) for the Production of Electricity. **Silesian University of Technology**, Konarskiego, Gliwice, Poland
- [5] **Knowlen C., Mattick A.T., Bruckner A.P., Hertzberg A.** 1998. High efficiency energy conversion systems for liquid nitrogen automobiles. **University of Washington**, Seattle, USA
- [6] **Ordonez C.A.** 1999. Liquid nitrogen fueled, closed Brayton cycle cryogenic heat engine. **North Texas University** USA.
- [7] **Ordonez C.A., Plummer M.C.**, 1996. Cold thermal storage and cryogenic heat engines for energy storage applications. **North Texas University** USA
- [8] **Li Z., Xu L, Sun H., Xiao Y., Zhang J.**, 2004. Investigation on performances of non-loss storage for cryogenic liquefied gas. Shanghai P.R.C.
- [9] **Schmidt D.D.** 2002. Biomass Boundary Layer Turbine Power System. **Energy Innovations Small Grant Program**, California, USA
- [10] **Tesla N.**, 1913. Fluid Propulsion. US Patent 1061142
- [11] **Couto H.S., Duarte J.B.F., Bastos-Netto D.** 2006. The Tesla Turbine Revised
- [12] **Cairns W.M.J(Camden Miniature Steam Services)** 2001. The Tesla Disc Turbine
- [13] **Vujic J., Marincic A., Ercegovac M., Milovanovic B.**, 2001. Nikola Tesla: 145 years Visionary Ideas
- [14] **Rice Warren.**, 1991. Tesla Turbomachinery. **Arizona State University**
- [15] **Hedin R.S.**, 1984. The Tesla Turbine
- [16] **Gingery D.J.**, 2004. Building **The Tesla Turbine**. ISBN 1-878087-29-0
- [17] **Tahil W.**, 1998. Theoretical Analysis of a Disc Turbine(Tesla Engine Builders Association Publications)
- [18] **Hoya G.P., Guha A.**, 2008. The Design of a Test Rig and Study of the Performance and Efficiency of a Tesla Disc Turbine **University of Bristol, University of Walk** UK

- [19] **Guha A., Smiley B.**, 2009. Experiment and Analysis for an Improved Design of the inlet and nozzle in Tesla disc Turbines. **University of Bristol** UK
- [20] **Eyice Suavi.**, 1956. **Buhar Türbinleri Hesap ve Konstrüksiyonları.** **İstanbul Teknik Okulu Yayınları**, İstanbul, TR
- [21] **Andrews Ewart S.**, 1948: **The Strength of Materials.** Chapman & Hall Ltd London, UK.
- [22] **Elektro-Atomatik GmbH & Co. KG**, Technical Data Sheet for DC Loads
- [23] <<http://www.tfcbooks.com/mall/turbomac.htm#335>>-TE 04/01/2010
- [24] <<http://www.fnal.gov/pub/today/images04/vaporizer.jpg>> 04/03/2010
- [25] <<http://www.washington.edu/alumni/columns/dec97/car1.html>> 11/03/2010
- [26] <<http://www.mtse.unt.edu/CooLN2Car.html>> alındığı tarih 11/03/2010
- [27] <<http://tr.wikipedia.org/wiki/Azot>> alındığı tarih 24/02/2010
- [28] <http://en.wikipedia.org/wiki/Boundary-layer_thickness>19/03/2010
- [29] <<http://www.aeroflight.com/papers/bl/node2.html>> 19/03/2010
- [30] <<http://www.teslaengine.org/images/teba23p4.pdf>> 25/03/2010
- [31] <<http://www.mae.ufl.edu/NasaHydrogenResearch/h2webcourse/L11-liquefaction2.pdf>> 28/03/2010
- [32] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:3_fase_bridge_rectifier.svg> 12/04/2010

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Bedrettin DUMAN
Doğum Yeri ve Tarihi: Elazığ, 11/03/1981
Adres: Akşemsettin Mah. Cengiz Topel Cad. Cihan Sk.
No:39/6 Alibeyköy/İstanbul
Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi Makineleri ve
İşletme Mühendisliği Bölümü