

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DUYULUR VE GİZLİ ISI DEPOLAMA İLE
ATIK ISI GERİ KAZANIMLI BİR DİZEL MOTORUN
2. KANUN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah ÖZDEMİR

Anabilim Dalı: Makine Eğitimi

Programı: Enerji Eğitimi

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ESEN

TEMMUZ-2014

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DUYULUR VE GİZLİ ISI DEPOLAMA İLE ATIK ISI GERİ KAZANIMLI BİR
DİZEL MOTORUN 2. KANUN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah ÖZDEMİR

(101119105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Temmuz 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Temmuz 2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet ESEN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Hikmet ESEN (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Filiz ÖZGEN (F.Ü)

TEMMUZ- 2014

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında beni her konuda yönlendiren değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Mehmet ESEN ile yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarıma, ayrıca çalışmalarım sırasında desteğini hiç esirgemeyen eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emrah ÖZDEMİR

Elazığ-2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
2. ISI DEĞİŞTİRİCİLER	7
2.1. Isı Geçiş Şekline Göre Sınıflandırma	8
2.1.1. Akışkanın doğrudan temasta olduğu ısı değiştiriciler	8
2.1.2. Akışkanlar arası doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiriciler	9
2.2. Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflama	11
2.3. Isı Geçiş Mekanizmasına Göre Sınıflama	11
2.4. Akıma Göre Sınıflandırma	12
2.4.1. Tek geçişli ısı değiştiriciler	12
2.4.2. Çok geçişli ısı değiştiricileri	14
3. ISI DEPOLAMA VE ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	16
3.1. Duyulur Isı Depolama	19
3.1.1. Sıvı Ortamda Isı Depolama	20
3.1.2. Katı Ortamda Isı Depolama	23
3.1.3. İkili Ortamda Isı Depolama	23

3.2.	Gizli Isı Depolama	23
4.	MATERYAL VE METOT	26
4.1.	Deney Sistemi	26
4.2.	Deney Motoru	28
4.3.	Egzoz Gazı Isı Değiştiricisi	31
4.4.	Termal Enerji Depolama Tankı ve Kullanılan Faz Değişim Maddesi.....	32
4.5.	Sirkülasyon Pompası	35
4.7.	Çalışmada Kullanılan Enerji ve Ekserji Denklemleri.....	38
4.7.1.	Enerji analizi	38
4.7.2.	Ekserji analizi	40
5.	BULGULAR	42
6.	SONUÇLAR	50
7.	ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR		52
ÖZGEÇMİŞ.....		52

ÖZET

Günümüz dünyasında enerji her ülke için önemli bir varlıktır. Dünya'daki enerji ihtiyacı; nüfus artışı, sanayileşme ve yeni ihtiyaçlarla hızla artmaktadır. Buna karşın günümüz dünyanın temel enerji kaynağı olan fosil yakıtlarda artış olamamakta, yani kaynakların ihtiyacı karşılayamadığı bir noktaya doğru gidilmektedir. Dünyadaki bu enerji ihtiyacını gidermek için son yıllarda çok fazla araştırma yapılmaktadır. Bunun neticesinde var olan enerjiyi geri kazanma üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Enerjinin büyük çoğunluğunun ulaşım sektöründe tüketildiği görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı araştırmacılar yoğun bir şekilde içten yanmalı motorlar üzerinde durmaktadırlar. İçten yanmalı motorların egzoz gazları üzerinde yanma ısısının yaklaşık olarak % 30 'u atık ısı olarak dışarı atılmaktadır bundan dolayı atık ısıyı geri kazanmak çok önemlidir.

Bu çalışmada bir dizel motorun egzoz gazından olan atık ısısının depolanması için motor egzozunun çıkışına ısı depolama sistemi eklenmiştir. Isıl enerji depolama tankı, su içeren duyulur ısı depolama ve faz değişim maddesi içeren gizli ısı depolama ünitesinden oluşmuştur. Isı depolama sisteminin termodinamiğin 2. kanunu ışığında analizleri yapılmıştır. Deneyler dizel motorun 2000 dev/dk'lık devirde 0 Nm , 50 Nm ve 100 Nm'lik yük durumlarında enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl enerji depolama, atık ısı geri kazanımı, dizel motoru, Termodinamiğin 2. kanunu

SUMMARY

SECOND LAW ANALYSIS OF A WASTE HEAT RECOVERING DIESEL ENGINE WITH SENSIBLE AND LATENT HEAT STORAGE

In today's World the energy is an important entity for all countries. The energy requirement increases rapidly due to population growth, industrialization and new demands. On the other hand, fossil fuels which are main energy source of today's world could not be on the rise, in other words, it has been headed towards a point where the sources will be insufficient to meet needs. In recent years, much more researches have been done to meet these energy demands. As a result of this, wide-ranging scientific researches have been done in order to regain existing energy. It is seen that the great majority of energy is consumed in the transportation sector. Because of all these reasons, the researchers put emphasis on internal combustion engines intensively. Approximately % 30 of combustion heat in exhaust gases of internal combustion engines is released as waste heat; therefore, it is important to recuperate this waste heat.

In this study, the heat storage system was incorporated into engine exhaust port to store the waste heat consisting of exhaust gas of a diesel engine. The thermal energy storage tank composes of sensible heat storage and latent heat storage unit including material. The heat accumulation system analyses were made thanks to second law of thermodynamic. The experiments were made of 2000 rpm and in the condition of 0 Nm, 50 Nm and 100 Nm and the energy and exergy analyses of the system were formed.

Key Words: Thermal energy storage, waste heat recovery, diesel engine, the second law of thermodynamics

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Akışkanın direkt temasta olduğu ısı değiştirici tipi.....	9
Şekil 2.2. Akışkanın direkt temasta olmadığı ısı değiştiricisi tipi	10
Şekil 2.3. Sabit dolgu maddeli rejeneratörler	10
Şekil 2.4. Tek geçişli paralel akımlı ısı değiştiricisi tipi	12
Şekil 2.5. Tek geçişli ters akımlı ısı değiştirici	13
Şekil 2.6. Tek geçişli çapraz akımlı ısı değiştiriciler	13
Şekil 2.7. Çok geçişli ısı değiştiriciler	14
Şekil 2.8. Depo içine yerleştirilmiş spiral borulu ısı değiştirici	15
Şekil 3.1. Güneş enerjili termal enerji depolama tankı	17
Şekil 3.2. Isı depolanmasında uygulanan yöntemler.	18
Şekil 3.3. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması	24
Şekil 4.3. Deney motorunun bremze tezgahına bağlanmış hali	28
Şekil 4.4. Deneyde kullanılan dizel motor.....	28
Şekil 4.5. Montajı yapılmadan önce egzoz gazı ısı değiştiricisi	31
Şekil 4.6. Egzoz gazı ısı değiştiricisinin şematik gösterimi	31
Şekil 4.7. Deney motoruna bağlı egzoz gazı ısı değiştiricisi	32
Şekil 4.8. Termal enerji depolama tankı kesiti	33
Şekil 4.9. Yalıtımı yapılırken termal enerji depolama tankı.....	33
Şekil 4.10. Deney sistemi üzerinde termal enerji depolama tankı	34
Şekil 4.11. Deney sisteminde kullanılan sirkülasyon pompası	35
Şekil 4.12. Deney süresince kullanılan Data-logger.....	36
Şekil 4.13. Deneyde kullanılan anemometre	36
Şekil 4. 14. Deney setinin şematik gösterimi	37

Şekil 5.1. Farklı yüklerde dizel motorun enerji ve ekserji verimi	45
Şekil 5.2. Isı değıştirici ile geri kazanılan enerji ve ekserji	46
Şekil 5.3. Farklı yüklerde ısııl enerji depolamalı sistemin enerji ve ekserji verimi.....	47
Şekil 5.4. Farklı yükleme durumlarına bağılı olarak geri kazanılan enerji ve ekserji.....	48
Şekil 5.5. Dizel motor ve birleştirilmiş sistemin ekserji verimleri	49

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3. 1. Bazı depolama malzemelerinin 300 K sıcaklığındaki Özellikleri	19
Tablo 3.2. Duyulur ısı depolama için sıvı materyaller	21
Tablo 3.3. FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratların termo-fiziksel özellikleri	25
Tablo 4.1. Deney motorunun bazı özellikleri.....	29
Tablo 4.2. TÛPRAŞ 404 – Motorin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 5.1. Deney sisteminin enerji analizi	43
Tablo 5.2. Deney sisteminin ekserji analizi	44

SEMBOLLER LİSTESİ

A	:Ekserji
A_k	:Kazanılan ekserji
c_p	:Sabit basınçta özgül ısı
E	:Enerji
E_{eg}	:Egzoz gazının sahip olduğu enerji
E_{ID}	:Isı değiştiricisinin elde ettiği enerji
E_{ss}	:Soğutma suyunun enerjisi
E_{ş,t}	:Şarj etme süresince tankta toplam depolanan enerji
E_g	:Egzoz gazı
E_T	:Toplam enerji
E_y	:Yakıtın sahip olduğu enerji
H₀	:Yakıtın alt ısı değeri
L	:Tuz hidratın gizli ısısı
s	:Sistemde dolaşan su
ss	:Soğutma suyu
y	:Yakıt
W_d	:Dizel motor çıkış gücü
T₁	:Egzoz gazı giriş sıcaklığı
T₂	:Egzoz gazı çıkış sıcaklığı
T₃	:Soğutma suyu giriş sıcaklığı
T₄	:Soğutma suyu çıkış sıcaklığı
T₅	:Isı değiştiricisi giriş sıcaklığı
T₆	:Isı değiştiricisi çıkış sıcaklığı
T₇	:Faz değişim maddesi bir kademedeki sıcaklığı
T₈	:Faz değişim maddesi ikinci kademedeki sıcaklığı
T₀	:Referans durum sıcaklığı (çevre)
T_{fdm,son}	:Faz değişim maddesinin ortalama son sıcaklığı
T_{fdm,ilk}	:Faz değişim maddesinin ortalama ilk sıcaklığı
Δt_ş	:Şarj etme süresi
m	:Kütleli debi
η_ş	:Şarj etme verimi
η_d	:Dizel motor verimi

KISALTMALAR

TED	:Termal Enerji Depolama
FDM	:Faz Değişim Sıcaklığı
PCM	:Phase Change Material
ID	:Isı Değiştirici
rpm	:Devir/dakika

1. GİRİŞ

Enerji her ülke için ekonomik gelişme bakımından önemli bir varlıktır. Dünya'daki enerji ihtiyacı; nüfus artışı sanayileşme ve yeni ihtiyaçlarla hızla artmaktadır. Buna karşın günümüz dünyasının temel enerji kaynağı olan fosil yakıtlarda artış olamamakta, yani kaynakların ihtiyacı karşılayamadığı bir noktaya doğru gidilmektedir. Enerji ulaşım, üretim, ticari, tarım ve çeşitli faaliyetlerin yürütülmesinde en önemli etken olduğu günümüz dünyasında görülmektedir. Yaşadığımız yüzyılda ve gelecek yüzyıllarda enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya nüfusunun gün geçtikçe artması ve bu artış ile birlikte enerji talebinin artması insanoğlunu farklı enerji kaynaklarına yönlendirmektedir [1-3].

Enerji talebinin yansira fosil yakıtların yanmasından dolayı çevreye atılan gazlar atmosferi çok ciddi boyutta etkilemektedir. Enerji kaynakları günümüzde çoğunlukla ısıtma-soğutma, sanayide ve ulaşım alanındaki motorlu taşıtlarda kullanılmaktadır. Ayrıca petrol kökenli yakıt kullanımının insan sağlığını ciddi boyutlarda tehdit eden çevre kirliliği yapması ve küresel ısınma gibi problemlere neden olması, bilim adamlarını yeni ve yenilenebilir alternatif yakıtların araştırılmasına sevk etmiştir. Ayrıca fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere atılan gazların sera etkisi oluşturması da göz ardı edilecek bir konu olmadığı görülmektedir. Fosil yakıtların azalması, küresel ısınmanın artması, fosil yakıtların sebep olduğu çevre kirliliği ve yanmasının sonucunda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu asit yağmurları ve bunun gibi birçok sorun değerlendirildiğinde enerji verimliliği, kaynak çeşitliliği ve çevreye etkisi açısından yeni enerji kaynaklarına yönelmek ve yeni enerji kaynaklarını daha verimli halde kullanmak gerekmektedir [2-5].

Enerjinin dünyamız ve günümüz şartları için bu kadar değerli olmasından dolayı kullanılan enerjilerin daha verimli kullanılması gerekmektedir ama bunu tamamen başarmak mümkün olmamaktadır. Enerjinin çeşitlerinden olan ve önemli bir kısmını teşkil eden enerji olarak ısı enerjisi bu bağlamda dikkate değer bir enerji türüdür. Günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları ile etkin ve ucuz ısı depolama sistemlerinin geliştirilmesine yönelik yoğun araştırmalar sürdürülmektedir. Bu araştırmaların yapılmasının gerekçeleri fosil enerji kaynakları tüketim oranının azaltılması, dünyadaki fosil enerji kaynaklarının gelecekteki yıllarda tamamen tükenmesinin önlenmesi ve

günümüz enerji kaynakları varlığının korunması olarak gösterilebiliriz. Bu konuda ısı enerjisi depolama üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Termal enerji depolama (TED) enerjinin elde edilmesiyle, talep arasındaki fark ve yer-zaman arasındaki uyumsuzluğu gideren, hem ısıtma hem de soğutma için çözümler veren bir sistemdir. Konut, sanayi, tarım ve ulaşım sektörlerinde uygulama sansı bulunan TED, elektrik enerjisi ve kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtlardan tasarruf sağlayarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Doğal enerji kaynaklarından (hava, su, toprak ve güneş enerjisi) ve atık ısıdan yararlanmak için de termal enerji depolama gereklidir [4].

Termal enerji depolama sistemlerinin kullanılabileceği sistemlerden biri dizel motorlardır. Dizel motorlar en önemli güç üretim ünitelerinden biri olarak günlük hayatımızda varlık göstermektedir. Daha az bakıma ihtiyaç duyma ve yüksek verimlerin yanı sıra dizel motorlar fosil ve organik kaynaklardan türeyen yakıtları büyük bir oranda yakabilme özelliğine sahip güç üretim sistemleri olarak görülmektedirler. Dizel motorlar giren enerjinin yaklaşık olarak üçte ikisini egzoz gazı ve motor soğutma suyu aracılığıyla dışarıya atık olarak göndermektedir[8,10].

Yapılacak olan bu çalışmada, bir dizel içten yanmalı motorun egzoz gazlarıyla kaybolacak atık ısı, egzoz gazlarının çıkışına eklenecek olan ısı değiştirici ve faz değiştiren madde (FDM) içeren bir gizli ısı depolama ve su içeren bir duyulur ısı depolama ünitesi ile geri kazanılacak ve bu atık ısı geri kazanım sistemi ile birlikte 1.9 Multijet JTD dizel motorunun termodinamiğin 2. kanunu da göz önünde bulundurularak enerji ve ekserji analizi yapılacaktır.

1.1. Literatür Araştırması

Pandiyarajan v.d., içten yanmalı motorların egzoz gazının yanma ısını yaklaşı olarak %30 'unu atık ve çoğu enerji dönüşüm araçlarının çıkış buharındaki ısısında atık olarak çevreye gönderildiğini görüp bu atık ısı için gerekli çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında birleştirilmiş duyulur ve gizli ısı depolama sisteminde depolanan ve bir dizel motordan elde edilen enerji miktarını ve kalitesini ölçmek için verimli bir araç olarak ekserjinin kullanımını ele almışlardır. Bu analizlerin, geleneksel enerji analizlerinden daha gerçekçi ve anlamlı olduğunu göstermiş ayrıca düşünülen sistemin bileşenlerinin yararlı enerjideki kayıpların kaynaklarını tamamlamada kullanıldığını göstermişlerdir. Bu analizlerle tüm sistemin enerji ve ekserji dengesi, enerji ve ekserji diyagramları kullanılarak ölçülmüş ve örneklendirilmiştir [1].

Gopal v.d., enerji depolama sistemine dayalı FDM ile entegre edilmiş bir dizel motorun enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında bir dizel motorun egzoz çıkışına eklenmiş ısı değiştirici kullanılarak termal enerji depolama tankına enerjinin depolanmasını inceleyerek ekserji ve enerji analizi yapmışlardır. Bu analizler yapılırken tüm sistemde kurtarılan ekserji, ekserji akış diyagramları kullanılarak örneklendirilmiş ve ölçülmüştür. Çalışmalarında enerji ve ekserji akış diyagramları karşılaştırmışlardır. Dizel motor ve entegre edilmiş sistemin enerji ve ekserji denge diyagramları gösterilmiş ve bunlar üzerinden sonuçlar elde edilmiştir [2].

Öztürk, güneş enerjisinin gizli ısı depolama tekniği kullanılarak depolanması üzerine yaptığı çalışmada gizli ısı depolamanın kullanılmasındaki avantajlarını çalışmasında belirtmiştir. Gizli ısı depolama tekniğindeki faz değişim maddelerinin (FDM) özelliklerini ayrıntılı bir şekilde tablolar halinde göstermiş olup gizli ısı depolama tekniğinde kullanılması üzerinde durmuştur. Gizli ısı depolama tekniğinin diğer ısı depolama tekniklerine göre daha avantajlı olduğunu açıklamışlardır. Faz değiştiren maddelerin seçiminde dikkate alınması gereken ölçütler gösterilmiştir. Ayrıca gizli ısı depolama sistemlerinde karşılaşılan sorunlar ve bu sorunları giderebilecek çözümler üzerinde durmuşlardır [3].

Pandiyarajan v.d., tüm dünya için olan enerji kaybının azaltılması için girişimlerde bulunmanın önemli olduğunu belirtmiş ve bunun için dizel motor egzoz gazlarının geri kazanımı üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Bu deneysel çalışma için termal enerji depolama sistemi ve bir gövde-borulu bir ısı değiştirici kullanarak dizel motordan atık ısının geri kazanılması için gereken deney düzeneğini kurmuşlar ve bu sistemlerini termodinamiğin kanunları ile enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Bu analizlerini grafiklerle göstermişlerdir [4].

Paksoy v.d., termal enerji depolamanın iklim değişikliği ile mücadelede enerji tasarrufu ve verimliliğini artıran, ısıtma ve/veya soğutmaya yönelik esnek çözümler oluşturabileceğini göstermek için çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmalarında termal enerji depolama tekniklerinin bina, tarım ve test kabini gibi üç farklı uygulamalarından elde edilen sonuçları göstermişlerdir. Mevsimlik termal enerji depolamanın domates yetiştirilen bir serada kullanılmasıyla %68 enerji tasarrufu sağlamışlardır. Test kabini için geliştirilen faz değiştiren maddede termal enerji depolama ünitesi ile ısıtma ve soğutma yüklerinin sırasıyla %17 ve % 7 ye kadar düşürülebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca bir süper market için uygulanan yine mevsimsel depolama sonucunda %60 oranında bir tasarruf elde edildiğini göstermişlerdir. Elde edilen sonuçlardan yararlanarak Türkiye’de alternatif enerji kaynaklarının termal enerji depolamayla değerlendirmenin hem ekonomik hemde çevresel olarak belirli katkılarının olacağını göstermişlerdir [5].

Yılmazoğlu çalışmasında ısı enerjisinin depolama yöntemleri olan sıvılarda depolama, katılarda depolama, mevsimsel depolama, kimyasal depolama ve faz değişim maddelerinde depolama yöntemlerini incelemiştir. Ayrıca bu depolama yöntemlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususları da belirtmiştir. Binalarda enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturan ısı enerjisinin, depolama yöntemleri ile azaltılması zorunlu hale geldiğini belirtmiştir. Isı enerjisi depolama yönteminin binalarda kullanılması ile birlikte çevre kirliliğinin azalacağını ve enerji tasarrufunun olacağını belirtmiştir [6].

Zalba v.d., faz değişim malzemeleri içeren ısı enerji depolama sistemlerinde ısı geçişi ve uygulamaları hakkında literatürde çıkan son 20 yılın makalelerini derlemişlerdir. Makalede 200’ün üzerinde referans yer almaktadır. Ayrıca faz değişim maddesi olarak 150 tane madde listelenmiş ve ticari olarak uygun faz değişim maddesinin yaklaşık olarak 45 tane olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalar faz değişim malzemeleri, ısı transfer analizleri ve uygulamalar olmak üzere üç alanda toplamışlardır [7].

Yazman çalışmasını üç aşamada gerçekleştirmiştir. Çalışmasında güneş enerjisiyle sıcak su elde etmek için kullanılan sistemlerde kullanılabilecek FDM'leri bulup bunların ısı iletkenliğini arttırarak uygulamada kullanmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, ticari ölçekte parafin (Rubitherm-RT54), sodyumasetat trihidrat ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ve analitik saflıkta değişik yağ asitleri (stearik, palmitik, miristik ve laurik asit) karışımları hazırlanarak denenmiştir. FDM 'lerin çoğu çok düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bu durum enerji depolama sisteminin etkinliğini büyük oranda azaltmaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasında FDM ve ısı taşıyıcı akışkan arasındaki ısı transfer hızını arttırmak için FDM'nin olduğu depo ortamına paslanmaz çelik bloklar (0.05 L/s akış hızı), bakır borular (0.025 L/s, 0.05 L/s akış hızı) ve grafit matriksler (0.01 L/s, 0.025 L/s, 0.05 L/s akış hızı) eklenmiştir. Güneş enerjisiyle sıcak su eldesi sistemlerinde depodaki su kısa süreli depolamada kullanılır. Bu sistemde suyun duyulur ısısı doğal tabakalaşmayla depolanır. Çalışmanın üçüncü bölümünde tankın üst bölümüne FDM modüller yerleştirilerek sistemin depolama yoğunluğu arttırılmış ve ısı kayıpları azaltılarak FDM 'ler yardımıyla gizli ısıda depolanmıştır [8].

Günerhan, çalışmasında dünyadaki fosil enerji kaynaklarının gün geçtikçe artmasından dolayı duyulur ısı depolama üzerinde çalışmasını gerçekleştirmiştir. Çalışmasında ısı iletkenliği depolama üzerinde durmuştur ve Türkiye'nin Diyarbakır, İzmir, Uşak, Gediz, Muş, Bitlis, İskenderun, Boyabat, Eskişehir ve Van gibi il ve ilçelerinde bulunan bazalt taşı, ısı depolama uygulamalarında çakıl taşı olarak kullanılabileceği üzerine çalışmıştır [9].

Öztürk, çalışmasında gizli ısı tekniği ile güneş enerjisi depolama uygulamaları için faz değiştiren materyal (FDM) seçiminde dikkate alınması gereken ölçütler, gizli ısı depolama sistemlerinin etkinlik ve uygulanabilirliği ile gizli ısı depolama sistemlerinde karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri tartışılmıştır[10].

Ghazinkahi v.d., çalışmalarında bir DI dizel motordan ekserji geri kazanımını turbo şarjlı bir dizel motorda 1200, 1400, 1600, 1800 ve 2000 devir/dakika gibi farklı devirlerde ve 20, 40, 60, 80ve 100 Nm torklarında test ederek araştırmışlardır. Bu amaçla çalışma belirli akış oranlarında olan çift borulu ısı değiştirici motor egzoz gazının çıkışına yerleştirilmiştir. Yük ve motor hızlarını arttırarak kazanılan ekserjinin arttığını belirtmiştir. Ayrıca egzoz gazından geri kazanılan ekserjinin kullanımından dolayı özgül yakıt tüketiminin azalması üzerine belirli çalışmalar yapmıştır. Çalışma sonuçları özgül yakıt tüketiminin yaklaşık olarak %10 azaldığını göstermiştir [11].

Hatami v.d., çalışmalarında dizel motorlardan atık ısı geri kazanım teknolojilerinden bilgi verdikten sonra motorların egzozlarında kullanılan ısı değiştiricilerinin en yaygın olanlarını tanıtmıştır. Isı değiştiricilerin dizel motorlarında uygun olanlarının kullanımı ile dizel motor atık ısısının daha fazla geri kazanılabileceğini belirtmiştir [12].

Sharma v.d., faz değişim maddeleri kullanılarak termal enerji depolama yöntemi olan gizli ısı depolama yönteminin üzerinde durmuştur. Bu yöntemin diğer depolama yöntemlerine göre en verimli yol olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında farklı uygulamalarda kullanılan faz değişim maddelerinin uygun termal enerji depolama sistemlerinin gerekli analizlerini ve araştırmalarını gerçekleştirmiştir [13].

Salman v.d., çalışmalarında içten yanmalı motorlarda egzoz gazları, soğutma suyu ve sürtünmeler yoluyla kaybedilen ısı enerjinin belirlenmesi üzerine çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmalarını tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda deneysel olarak yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını motor devrine bağlı olarak silindirlere gönderilen yakıt ile oluşan ısının motor çıkışındaki diğer ısı miktarları hesaplamışlardır [14].

2. ISI DEĞİŞTİRİCİLER

Mühendislik uygulamalarının en önemli ve en çok karşılaşılan işlemlerinden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı geçişidir. Bu değişimin yapıldığı cihazlar, ısı değiştirici ve eşanjör olarak adlandırılmakta olup, pratikte termik santrallerde, kimya endüstrilerinde, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, taşıt araçlarında, elektronik cihazlarda, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında ısı depolanması gibi birçok yerde kullanılmaktadır [8,9,15].

Isı değiştiricileri içinde yoğuşma ve buharlaşma gibi bir faz değişimi yoksa bunlara duyulur ısı değiştiricileri, içinde faz değişimi olanlara ise gizli ısı değiştiricileri denir. Ayrıca buhar kazanları, nükleer santrallerde elektrikli ısıtıcılar da içinde ısı üretimi olan birer ısı değiştiricisi olmasına rağmen ayrı olarak incelenmektedir [9]. Isı değiştiricilerinde akışkanlar genellikle birbiriyle karıştırılmadan ısı geçişinin doğrudan yapıldığı çoğunlukla metal malzeme olan katı bir yüzey ile birbirinden ayrılırlar. Bu tip ısı değiştiricileri yüzeyli veya reküparatif olarak adlandırılır.

Dolgu maddeli veya rejeneratif olarak adlandırılan diğer tip ısı değiştiricilerinde, ısı geçişi doğrudan olmayıp, ısıнын önce sıcak akışkan etrafında dönmesiyle yada sabit bir dolgu maddesine verilmesiyle depo edildikten sonra soğuk akışkana aktarılmasıyla meydana gelir. Genel olarak reküparatif ısı değiştiricilerinde incelemeler zamandan bağımsız olarak yapılırken, rejeneratif ısı değiştiricilerinde incelemeler zamana bağlı olarak yapılır [3,16].

Uygulamalarda ısı değiştiricilerin halen kullanım aşamasına gelmeden ısı değiştiricilerin tipini seçmek gerekmektedir. Isı değiştiricilerin tipini seçerken dikkate alınması gereken faktörler:

- Yapı malzemesi
- Sıcaklık ve basınca karşı duyarlılık
- Performans parametreleri (debi, basınç düşümleri, verimlilik vb.)
- Kirlenme faktörü
- Daha sonra kullanım için muayene, temizleme, tamir ve ilave imkânı
- Akışkan tipi ve fazı

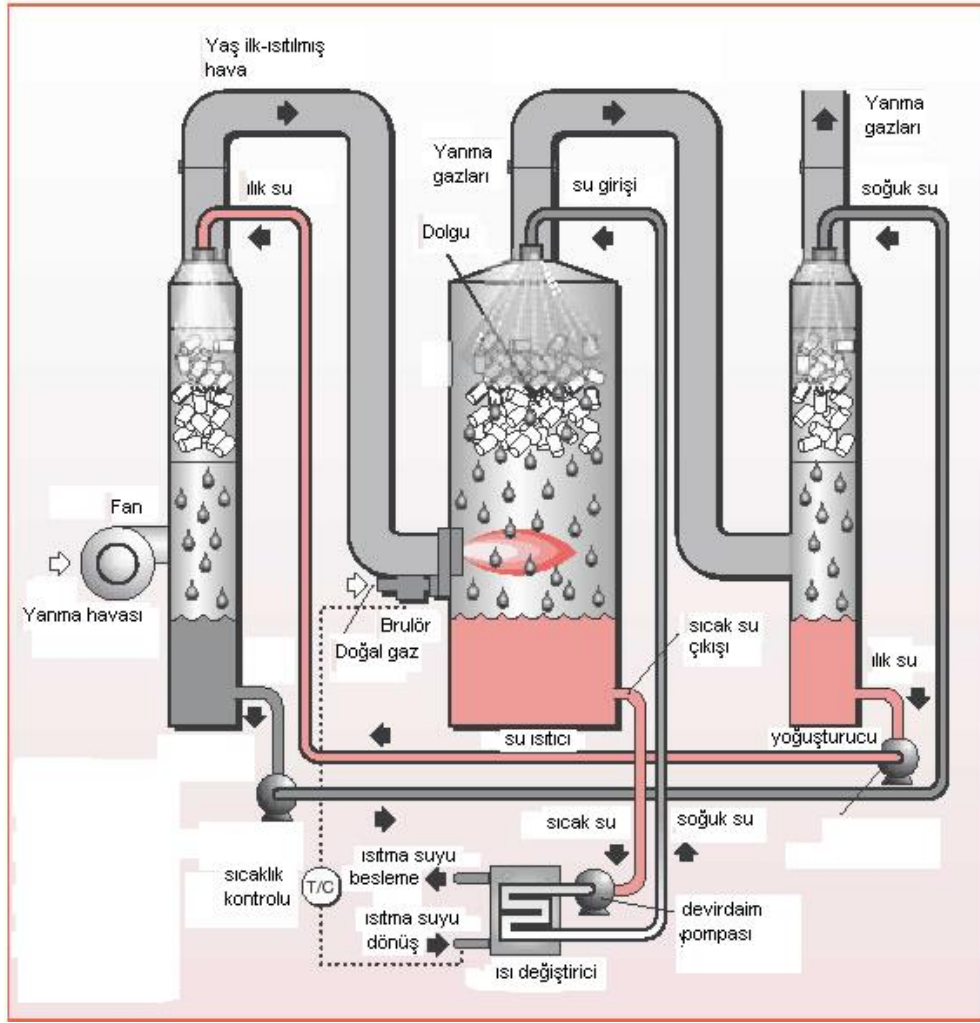
- Isı değiştiricisi ebatları
- Bulunabilirlik
- Ekonomik olması

Isı değiştiriciler ısı geçiş şekline, yapı özelliklerine, akış düzenlenmesine, akışkan sayısına veya akışkanların faz değişimlerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar ısı değiştirici seçiminde çalışmacılara kolaylık sağlamaktadır [3,10,17].

2.1. Isı Geçiş şekline Göre Sınıflandırma

2.1.1. Akışkanın doğrudan temasta olduğu ısı değiştiriciler

Bu tip ısı değiştiricileri içinde farklı sıcaklıklardaki akışkanlar veya bir akışkan ile katı maddeler birbirleriyle doğrudan doğruya karıştırılır veya temasa geçirilir. Isı, doğrudan temaslı ısı değiştiricilerinde aralarında doğrudan temasın olduğu soğuk ve sıcak akışkanlar arasından iletilir. Tek kısıtlama akışkanların karıştırılmaz cinsten olmasıdır. Bu tip ısı değiştiriciler genellikle borusal malzemeler ve plakalar kullanılarak tasarımıları yapılmaktadır. Bu ısı değiştiricilerin akışkanları karıştırılmaz sıvılar, gaz-sıvı, sıvı-buhar olacak şekilde e ayırabiliriz [8,18]. şekil 2.1’de akışkanın doğrudan temasta olduğu ısı değiştiricilerine örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Akışkanın direkt temasta olduğu ısı değiştirici [18]

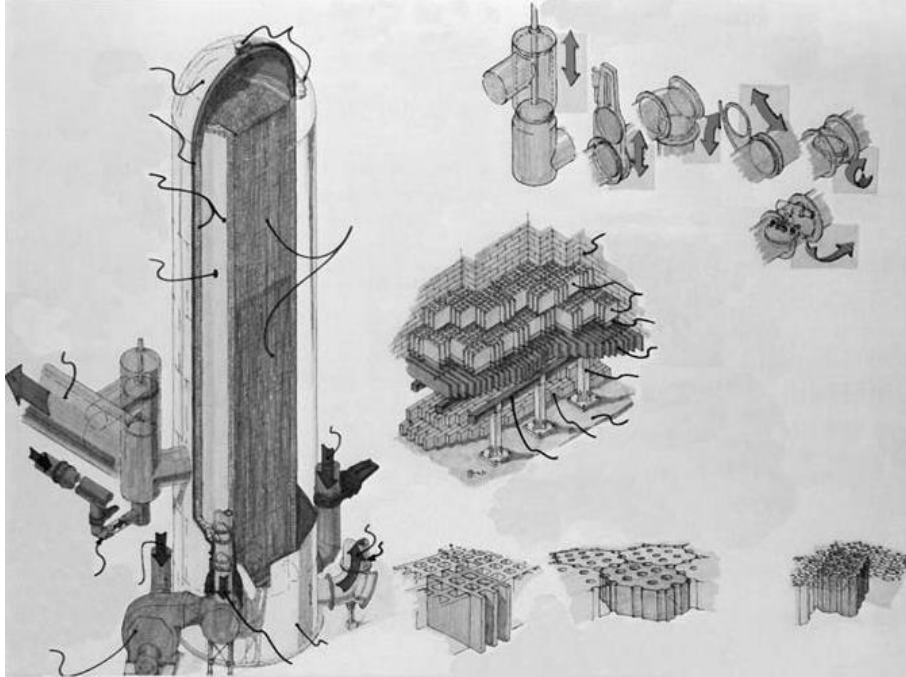
2.1.2. Akışkanlar arası doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiriciler

Bu tiplerde ısı, önce sıcak akışkandan iki akışkana ayıran bir yüzeye veya bir kütleye geçer. Daha sonra bu ısı bu yüzeyden veya kütleden soğuk akışkana iletilir. Isı enerjisi, ayırıcı cidar boyunca transfer edilirken soğuk ve sıcak akışkanlar aynı anda akarlar ve bu akışkanlar birbirlerine karışmazlar. Yüzeyli, dolgu maddeli ve akışkan yataklı olmak üzere üç grupta incelenebilir. Bu ısı değiştiricilerine gövde borulu ısı değiştiriciler örnek verilebilir. Gövde borulu ısı değiştiriciler endüstride en yaygın olarak kullanılan ısı değiştiricisi tipidir. Bir değer verilmek istenirse tüm ısı değiştiricilerin üçte ikisi gövde borulu ısı değiştiricidir. Şekil 2.2’de gösterilen bir gövde borulu ısı değiştirici tipidir.



Şekil 2.2. Akışkanın direkt temasta olmadığı ısı değıştircisi tipi [18]

Dolgu maddeli ısı değıştircilerine örnek olarak Şekil 2.3’de sabit dolgu maddeli rejeneratör görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.3. Sabit dolgu maddeli rejeneratörler [18]

2.2. Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflama

Isı değıştircilerinde genellikle iki akışkan arasındaki ısı geişı göz önüne alınır. Ama bununla birlikte çok nadir bile olsa bazı kimyasal işlemlerde, soğutma tekniğinde, havanın ayrıştırılmasında, hidrojenin saflaştırılması ve sıvılaştırılması gibi olaylarda üç akışkanlı ısı değıştircileri ile karşılaşılabilir [17]. Üç akışkanla çalışan ısı değıştircilerine kullanan bir sisteme örnek olarak, evsel ve taşıt araçlarında küçük kapasiteli, (NH_3 + su) eriyikli absorpsiyonlu tesislerde, H_2 gibi üçüncü bir nötr gaz kullanılarak elde edilen ısı enerjisi ile çalışan pompasız soğutma makinesi gösterilebilir. Üç ve çok bileşenli ısı değıştircilerinin tasarımı matematiksel açıdan oldukça karmaşıktır [3,8,17].

2.3. Isı Geçiş Mekanizmasına Göre Sınıflama

Isı değıştircilerinin iki tarafındaki tek fazlı akışlardaki ısı taşınımı bir pompa veya vantilatör ile tahrik edilen zorlanmış yada yoğunluk farkının doğurduğu doğal olarak olabilir. Oda ısıtıcıları, buhar kazanları ekonomizörleri ve hava ısıtıcıları, taşıt radyatörleri ve hava soğutmalı ısı değıştircileri önemli uygulamalarıdır [17,19].

Bir tarafta tek fazlı, diğer tarafta çift taraflı akışlı ısı değıştircilerinin tek taraflarında zorlanmış veya tek fazlı akış varken, diğer tarafta kaynamakta veya yoğunlaşmakta olan iki fazlı akış vardır. Bunlara ait örnekler, termik santrallerin yoğunlaştırıcıları, soğutma sistemlerinin yoğunlaştırıcısı veya buharlaştırıcısı ile buhar kazanları sayılabilir.

İki tarafta da çift fazlı akışlı ısı değıştirci bir taraflarında buharlaşma ve diğer taraflarında yoğunlaşma işlemi olan ısı değıştircileridir. Bunlar hidrokarbonların damıtılmasında, yüksek basınçlı buhar kullanılarak alçak basınçlı buhar elde edilmesi için kullanılır.

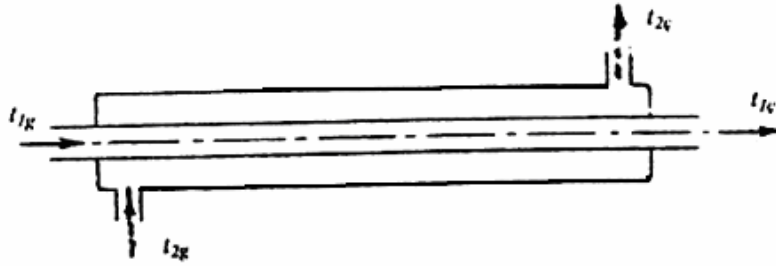
Taşınım ve ışınlama beraber ısı geişı türünde özellikle bir tarafında yüksek sıcaklıkta gaz olan ısı değıştircilerinde taşınım ve ışınlama ısı geişı bir arada görülür. Yüksek sıcaklıkta dolgu maddeli rejeneratörler, fosil yakacak yakan ısıtıcılar, buhar kazanları ve bunların kızdırıcıları ile piroliz ocakları bu tip ısı değıştircilerine örnektir [3,8,19,20].

2.4. Akıma Göre Sınıflandırma

2.4.1. Tek geçişli ısı değiştiriciler

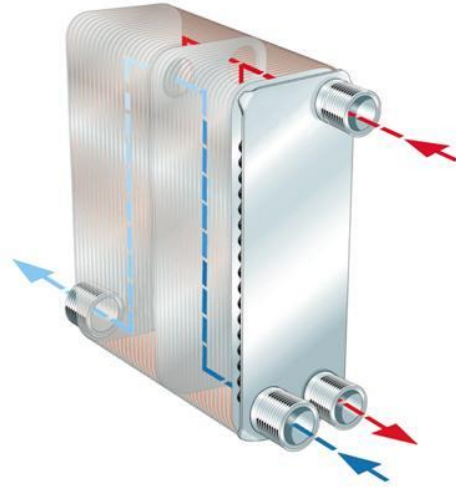
Bu tip ısı değiştiricilerde iki akışkan birbirlerine göre sadece bir defa karşılaşmaktadırlar. Tek geçişli ısı değiştiriciler de kendi aralarında paralel, ters ve çapraz akımlı olmak üzere üç grupta incelenebilir.

İlk olarak tek geçişli ısı değiştiriciler gruplandırılacak olursa en yaygın olarak kullanılabilen paralel akımlı tipi açıklanabilir. Bu düzenlemede ısı değiştirici içindeki iki akışkan değiştiricinin aynı ucundan ısı değiştiriciye girip, birbirlerine paralel olarak akımlı olurlar ve değiştiricinin diğer ucundan çıkarlar. Isı değiştirici boyunca akışkan sıcaklığının değişimi tek boyutludur. Isı değiştiricinin ısı geçişi olan cidar sıcaklığı fazla değişmediğinden, ısı gerilmelerinin istenmediği yerlerde tercih edilir [21]. Tek geçişli paralel akımlı ısı değiştiricilerine örnek Şekil 2.4'te görsel olarak verilmiştir.



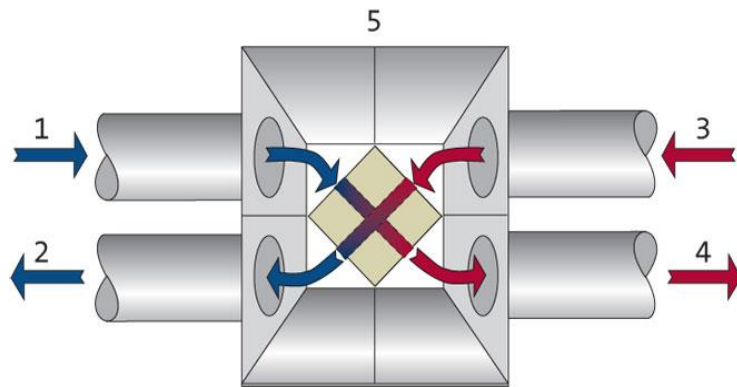
Şekil 2.4. Tek geçişli paralel akımlı ısı değiştiricisi tipi [21]

Tek geçişli ısı değiştiriciler gruplandırıldığında sıklıkla kullanılan bir diğer tip ısı değiştirici ters akımlı ısı değiştiricileridir bu grubun içine girebilmektedirler. Bu tipte akışkanlar ısı değiştirici içinde birbirine göre aksel olarak paralel, fakat ters yönde akarlar. Ters akımlı ısı değiştiricilerinde, değiştiricideki ortalama sıcaklık farkı ve etkenlik, diğer bütün akış düzenlemelerine göre daha büyüktür. Bu üstünlüğünden dolayı bu tip ısı değiştiricileri pratikte tercih edilir. Fakat ısı geçişi olan malzeme sıcaklığının değiştirici boyunca fazla değişmesi, bunun sonucu ısı gerilmelerin artması ve imalatındaki konstrüksiyon güçlükleri sebebiyle bu düzenleme bazen tercih edilmeyebilir [28]. Şekil 2.5'te tek geçişli ters akımlı ısı değiştirici örneği verilmiştir.



Şekil 2.5. Tek geçişli ters akımlı ısı değıştirci [20]

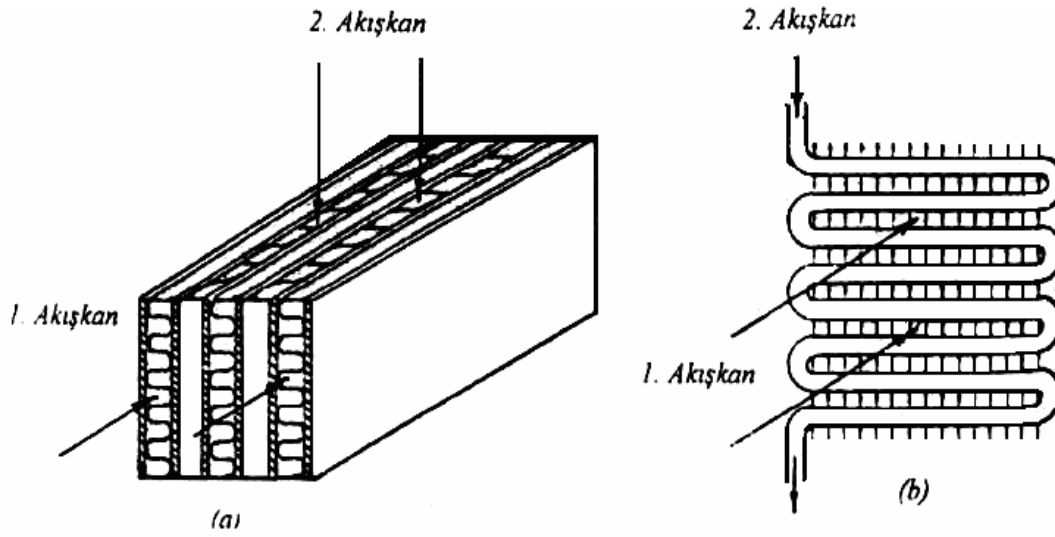
Tek geçişli ısı değıştirciler gruplandırıldığında çapraz akımlı ısı değıştirciler bu grubun içinde yer almaktadır. Bu düzenlemede ısı değıştirci içindeki akışkanlar birbirlerine dik olarak akarlar. Yapılan konstrüksiyona göre, kanatlar veya şaşırtma levhaları yardımıyla, akışkanlar değıştirci içinde ilerlerken kendi kendileri ile karşılaşabilir veya karşılaşmayabilir. Akışkan değıştirci içinde borular içinde akıyorsa ve bitişik kanal içindeki akışkan ile karışmıyorsa, bu akışkana karışmayan adı verilir. Terski durumda ise karışan akışkan adı verilir [17, 22]. Şekil 2.6’da tek geçişli çapraz akımlı ısı değıştircilerine örnek verilmiştir.



Şekil 2.6. Tek geçişli çapraz akımlı ısı değıştirciler [22]

2.4.2. Çok geçişli ısı değiştiricileri

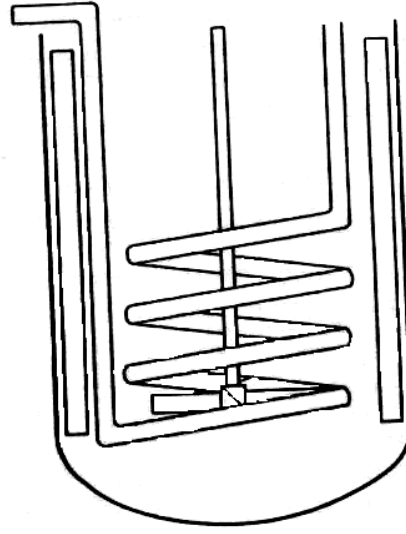
Çapraz-ters ve çapraz-paralel akımlı düzenlemeler genellikle kanatlı yüzeyli ısı değiştiricilerinde tercih edilir. İki veya daha fazla sayıda çapraz geçiş arka arkaya ters veya paralel akımlı olarak seri halde bağlanır. Yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda, ısı değiştiricilerinde ısıl gerilmeler malzemeler açısından, sıcaklığın fazla olduğu bölgelerde sıcağa dayanıklı pahalı malzemeler, diğer bölgelerde ise ucuz malzemeler kullanılarak imalat masrafları azaltılabilir. Çok geçişli ısı değiştiricilerini daha iyi kavrayabilmek için şekil 2.7’de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.7. Çok geçişli ısı değiştiriciler [21]

Çok geçişli ısı değiştirgeçlerinin diğer türü gövde borulu ısı değiştiricileridir. Gövde akışkanının karışırıldığı, paralel-ters, bölünmüş akımlı, ayrı akımlı düzenlemeler pratikte en çok kullanılan tiplerdir. Bu düzenlemeler TEMA (Tubular Exchanger Manufactures Association) boru sayısı arttığında sistemin etkenliği, iki akışkanın da karıştığı çapraz akımlı ısı değiştiricisine yaklaşmaktadır. Bir gövde içinde tek sayıda boru geçiş düzenlemelerinin etkenliği, çift sayıdaki düzenlemelere karşı biraz daha iyi olmasına rağmen imalat güçlükleri ve ısıl gerilmeler sebebiyle pratikte fazla tercih edilmez [21].

Bir diğer çok geçişli ısı değiştirgeci olarak levha tipi düzenlemeler verilebilir. Levha tipi ısı değiştiricilerinde, levhaların çeşitli şekilde düzenlenmesi ile çok geçişli akımlar elde edilebilir. Levhaların konumlarına ve yapısal özelliklerine bağlı olarak çok çeşitli akımlar elde edilebilmektedir. Bir diğer ısı değiştirici tipi ise spiral borulu ısı değiştiricidir. Bu ısı değiştirici şekil 2.8’de bir rneği gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Depo içine yerleştirilmiş spiral borulu ısı değiştirici[21]

Bu çalışmada spiral borulu ısı değiştirgeci kullanılmıştır. Spiral borulu ısı değiştiriciler bir depo içine yerleştirilen spiral şeklinde sarılmış bir veya daha fazla borulardan oluşmaktadır. Isı transfer katsayısı, spiral bir boruda düz bir borudakinden daha yüksek olduğundan spiral sarım kullanılır. Bu ısı değiştiricileri genellikle havuz ve depolardaki akışkanların sıcaklık kontrolünde kullanılır. Helisel bir şekilde yapılabilen serpantinin adımı, sarım çapı ve alanı uygun bir şekilde seçilebilir. Küçük serpantinlerin depo içinde desteğe ihtiyacı olmamasına rağmen, büyük serpantinlerin desteklenmesi gerekir.

Spiral borulu ısı değiştirgecinin özellikleri aşağıda olduğu gibi sıralanabilir:

- Temizleme hemen hemen imkânsız olduğundan, temiz akışkanlar için uygundur.
- Soğutma sistemlerinde kullanılan kondenserler ve eş eksenli evaporatörler olarak tasarlanabilmektedir.

Spiral borulu ısı değiştirgecinin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Avantajları, basit ve ucuz olarak elde edilebilmesi, ısı genleşmenin oluşturduğu gerilme problemlerinin görülmemesi, spiral borunun dış yüzeyinin ve deponun kolaylıkla temizlenebilir olması sayılabilir. Spiral borulu ısı değiştiricilerin dezavantajı vardır ama basit bir yapısı olduğundan dolayı yok denecek kadar azdır. Dezavantajı olarak spiral borunun iç yüzeyi mekanik olarak kolay bir şekilde temizlenemez ve tabakalaşmış akışkan tıkanmalara neden olmaktadır [21].

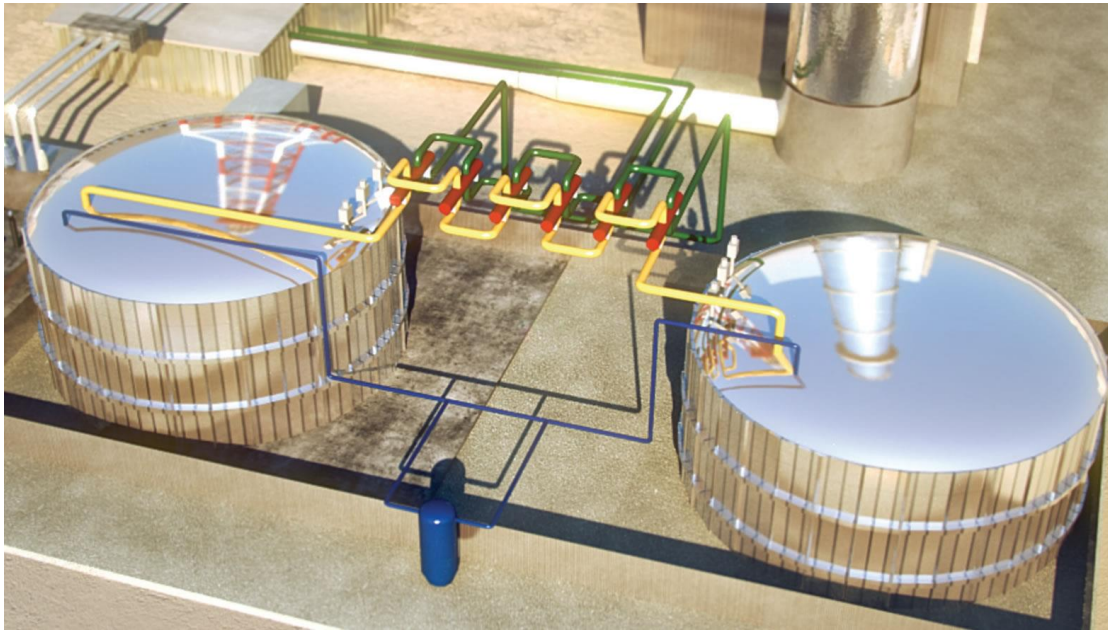
3. ISI DEPOLAMA VE ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

İnsanlık tarihi boyunca çağdaşlaşma alanında en önemli gelişmeler, artan enerji tüketimiyle sağlanmıştır. Günümüzde enerji tüketimi, yaşam standartlarının düzeyi ve ülkelerin endüstrileşme derecesiyle doğrudan ilişkili olarak görülmektedir. Dünya yaşam düzeyini arttırmak için, mevcut enerji tüketiminin önemli oranda arttırılması gerekecektir. Bu nedenle, artan enerji gereksiniminin enerji koruma yöntemleri uygulanarak azaltılması gerekir [1-3].

Doğal korunum yasaları, enerjinin yaratılamayacağını ve yok edilemeyeceğini belirtir. Ancak, uygun bir yöntem kullanılarak, bir türden ötekine dönüştürülmesi olanaklıdır [15]. Güneş enerjisi ve nükleer enerji dışında, genellikle enerjinin doğal yoldan depolanmış türleri kullanılır. En sık uygulanan enerji depolama biçimi, araç depolarına yakıt doldurulması örneğinde olduğu gibi, bu doğal kaynağın saklanmasıdır. Bazen de enerji, doğal kaynağından elde edildikten sonra, ilerde kullanılmak için yeniden depolanabilir. Bu yöntem, yeni bir dönüşüm işlemi ve enerjinin bir bölümünün bu işleme harcanmasını gerektirir.

Enerjinin depolanması şu nedenlerden gereklidir: Gereksiniminde oluşacak dalgalanmaları karşılamak; daha sonra yararlı olabilecek enerjinin boşa harcanmasını önlemek; uzunca bir süre enerji biriktirerek bunu bir anda tüketmek; sürekli iletim sistemlerinin kullanışlı ve elverişli olmadığı durumlarda enerji kaynaklarını taşımak.

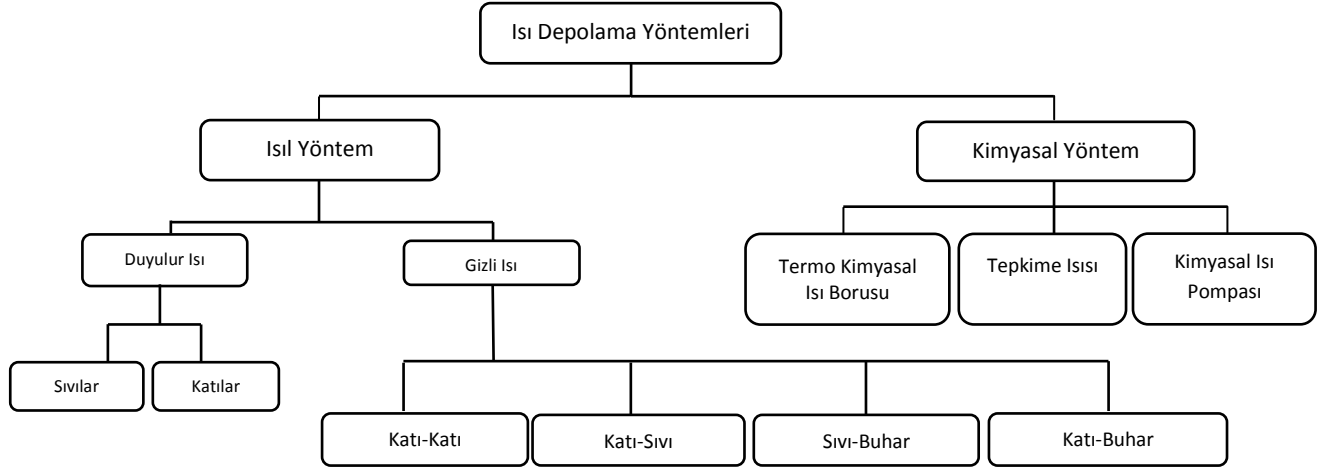
Günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları ile etkin ve ucuz ısı depolama sistemlerinin geliştirilmesine yönelik yoğun alıştırmalar sürdürölmektedir. Bu araştırmalar fosil enerji kaynakları tüketim oranının azaltılması, dünyadaki fosil enerji kaynaklarının gelecekteki yıllarda tamamen tükenmesinin önlenmesi ve günümüz enerji kaynakları varlığını koruması üzerine gerekli çalışmalar yapılmaktadır. Isı depolamanın önemi bu gerekçelerden dolayı gün geçtikçe artmaktadır. şekil 3.1’de bir güneş enerjili termal enerji depolama tankı gösterilmiştir.



şekil 3.1. Güneş enerjili termal enerji depolama tankı [19]

Isı enerjisi bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin, kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır ve atomik veya moleküler titreşimler sonucu oluşur. Isı enerjisi, maddenin iç enerjisindeki değişme ile duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısısı ya da tüm bunların birleşimi olarak depolanır [3,8].

Şekil 3.2’de ısı depolanmasında uygulanan yöntemler gösterilmiştir. Bu yöntemlerin ısı yöntem ve kimyasal yöntem olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ısı yöntem kullanılacaktır.



Şekil 3.2. Isı depolanmasında uygulanan yöntemler [8].

Isı depolama uygulaması ile sağlanan ekonomik/sosyal etkiler aşağıda sıralandığı gibi belirtilebilir [3,8,9]:

- Isı depolama ile yakma/elektrik teknolojilerinden daha ucuz sağlanabilir.
- İkincil enerji kaynağının kirlilik sorunu yoktur.
- Fosil özellikte olmayan birinci enerji kaynaklarının uygulanabilirliği artırılır.
- Merkezi olmayan elektrik üretimiyle, elektrik iletim maliyeti azaltılabilir.
- Isı depolama, konutların ve ısıtma-havalandırma-iklimlendirme sistemlerinin tasarımında, önemli bir işleve sahip olabilir. Maliyet etkinliğinin saptanabilmesi için, ayrıntılı teknik ve maliyet analizleri gereklidir.
- Güneş enerjisi ile tüm yıl boyunca ısıtma sağlamak için ekonomik olarak mevsimlik ısı depolama gereklidir.
- Aküfer, göller ve rezervuarların ısı depolama etkinlikleri belirlenmelidir.

3.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama sisteminde, ısı depolayan materyalin sıcaklığındaki değişim sonucu ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanılır. Isı depolama materyali olarak, sıcaklığı arttırıldığında duyulur ısı şeklinde ısı depolayabilen katı ve sıvı materyaller kullanılır [3]. Depolanabilecek ısıнын miktarı; ortamın ısı kapasitesine, sıcaklıktaki değişim miktarına ve depolama materyalinin miktarına bağlıdır. Duyulur ısı katı veya sıvı materyalde depolanabilir. Duyulur ısı depolanmasında kullanılan sıvılar genellikle; su etilen glikol, su-etilen glikol (% 50-50) ve bazı alkoller kullanılmaktadır [8]. Depolama materyalindeki ısı aşağıdaki formülden hesaplanabilmektedir.

$$Q = m c_p (T_{\text{son}} - T_{\text{ilk}}) \quad (3.1)$$

Tablo 3.1’de bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin 300 K sıcaklığındaki özellikleri verilmektedir. Bu özellikler duyulur ısı depolama miktarını hesaplamada kolaylıklar sağlamaktadır.

Tablo 3. 1. Bazı depolama malzemelerinin 300 K sıcaklığındaki özellikleri [9]

Materyal	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı iletim kat. (W/mK)	Özgül ısı (J/kg K)	Isı yayılım katsayısı (10 ⁻⁶ m ² /s)	Isı kapasitesi (10 ⁶ J/m ³ K)
Odun	721	0.159	1260	0.17	0.91
Beton	1600	0.790	840	0.59	1.34
Ateş tuğlası	1920	0.900	790	0.59	1.52
Cam	2710	0.760	837	0.33	2.27
Alüminyum	2702	237.000	903	97.13	2.44
Karbon Çeliği	78,54	60.500	434	17.75	3.41
Saf Demir	7870	80.200	447	22.80	3.52
Çakıl Taşı	2050	1.730	1840	0.46	3.77
Su	996	0.615	4178	0.15	4.16

Sıcaklığı T_1 ve kütlesi m olan bir madde T_2 sıcaklığına yükseltirirse, ısı kapasitesi dolayısıyla depolanan duyulur ısı,

$$Q = m.C_p.(T_2-T_1) = V.\rho.C_p.\Delta T \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, V maddenin hacmi, ρ yoğunluğu ve C_p sabit basınçtaki özgül ısıdır. Yukarıdaki bağıntıdan görüldüğü gibi, bir ΔT sıcaklık farkında ve belli bir hacimde depolanan ısı enerjinin fazla olması için maddenin hacimsel özgül ısısı (ρC_p) büyük olmalıdır. Yukarıdaki denklem duyulur ısı depolamada ısı kapasitesini belirlemek için kullanılmaktadır [9].

Duyulur ısı depolamada, şarj ya da deşarj esnasında ortamın sıcaklığı değişir. Duyulur ısı depolanmasında, hacimsel özgül ısının büyük olması yanında, yanma ve alevlenme özelliğinin olmaması, maddenin uzun süre (10-15 yıl) özelliklerini koruması, zehirli ve aşındırıcı olmaması istenir. Diğer yandan maddenin kolay temin edilebilir ve ucuz olması gerekir. Pratikte temin edilebilme kolaylığı ve ucuzluğu sebebiyle, daha çok su veya çakıl taşı tercih edilmektedir [3,8,10].

Duyulur ısı depolama sistemlerinin en cazip özelliklerinden biri şarj ve deşarj işlemlerinin tersinir olmasıdır. Yani sistemin ekonomik ömrü boyunca bu maddelerin ısıyı depolama ve boşaltma özellikleri devam eder.

Duyulur ısı depolama sistemlerinin kullanım sırasındaki genel problemlerinin önemli olanları aşağıda özetlenmiştir [8,9]:

- Isı depolama esnasında depolama sıcaklığı sürekli olarak arttığından sistemdeki ısı kayıpları fazladır.
- Sistemden ısı çekerken depolama sıcaklığı sürekli olarak düştüğünden ısı akış dağılımı oldukça küçüktür.
- Isı depolama işlemi, çevre sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda olmaktadır. Bundan dolayı sistemde iyi bir izolasyon gereklidir. Fakat bu da sistemin maliyetini artırmaktadır.

Duyulur ısı depolama, ısı depolama ortamına göre; sıvı ortamda depolama, katı ortamda depolama ve ikili (karışık) ortamda depolama şeklinde sınıflandırılabilir.

3.1.1. Sıvı Ortamda Depolama

Duyulur ısı depolama sistemlerinde ısı depolama materyali olarak kullanılan değişik sıvıların termo-fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Sıvı materyaller günümüz dünyasında bolca bulunduğu için temini kolay ve ekonomik olmaktadır. Sıvı materyallerde ısı depolama oldukça kolay görünmektedir. Duyulur ısı depolamada en çok kullanılan sıvı depolama maddesi sudur. Bunun nedeni ucuz ve bol olmasındandır.

Sıvı materyal olarak su güneş enerjisinin duyulur ısı olarak depolanmasında hem dünyada hem de ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır [9].

Tablo 3.2. Duyulur ısı depolama için sıvı materyaller [8]

Sıvı Materyaller	Sıcaklık Aralığı	Yoğunluk kg/m³	Isı Kapasitesi (J/kg°C)	Isıl İletkenlik W/m °C
Su	0-100	1000	4190	0.63 (38 °C)
Su-Etilen Glikol 50/50	-	1050	3479	-
Caloria HT 43	(-10) - 315	-	2300	-
Dowterms A	12 - 260	867	2200	0.112 (260°C)
Therminol 55	(-18) - 315	-	2400	-
Therminol 66	(-9) - 343	750	2100	0.106
Etilen Glikol	-	1116	2382	0.249
Hitec	141 - 540	1680	1560	0.61
Draw	220 - 540	1733	1550	-
Lityum	180 - 1300	510	4190	0.57
Sodyum	100 - 760	960	1300	38.1
Etanol	78	790	2400	67.5
Propil Asit	97	800	2500	-
Bütanol	118	809	2400	-
Izobütanol	100	808	3000	-
Izopentanol	148	831	2200	-
Oktan	126	704	2400	-

Depolama ortamı olarak su kullanmanın bazı avantajları aşağıda verilmiştir [8-10].

- Su ucuz ve kolay temin edilebilme özelliğine sahiptir,
- Zehirlenme ve alevlenme özelliği yoktur,
- Suyun fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri iyi bilinmektedir,
- Isı kapasitesi diğer sıvılardan büyüktür.
- Toplayıcılarda ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığında ısı değiştirici kullanmaya gerek yoktur.

- Isıtma ve soğutma sistemleri için gerekli sıcaklık aralığında kararlı bir sıvı-buhar dengesine sahiptir.
- Isı geçişi ve akışkan dinamiği iyi bilinmektedir.
- Korozyon etkisini azaltan inhibitör teknolojisi gelişmiştir.
- Kullanırken kontrolü, ölçümü ve ayarlanması kolaydır.

Isı depolayıcı madde olarak su kullanmanın dezavantajları [6,8-10]:

- Donduğu zaman genişlediğinden donmaya karşı tedbir alınmalıdır. Kollektör döngüsünde bir ısı değiştirici ile birlikte bir antifriz maddesine gereksinim vardır.
- Korozyon yapıcı özelliğinden dolayı depo içerisine inhibitör ilave edilmelidir.
- Suda ısıyı tabaka halinde depolamak zor olduğundan bu tür sistemlerde depoda tabakalaşma pek olmaz.
- Suda yüksek sıcaklıklarda enerji depolaması yapmakta zordur.

Pratikte depolama tankındaki su sıcaklığı, özellikle dikey boyutta uniform olmayacaktır. Soğuk su deponun alt tarafında, sıcak su ise deponun üst tarafında olacağından bir ısıl tabakalaşma oluşacaktır.

Depolama tanklarında meydana gelen ısıl tabakalaşmanın üç avantajı vardır:

- Depolama tankının üst tarafından, ortalama depo sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta su alınabileceğinden ısıtma verimi artacaktır.
- Toplayıcı giriş suyunun sıcaklığı ortalama depo sıcaklığından daha düşük olduğundan toplama verimi daha iyidir.
- Tabakalaşmalı depolama tankının sıcaklığı ısı yükünün sıcaklığına göre daha düşük bir ortalama sıcaklık değerinde olacağından depodan çevreye olan ısı kayıpları azalacaktır.

3.1.2. Katı Ortamda Isı Depolama

Isı depolamanın genellikle sıvı ortamda depolanabildiği düşünölmektir fakat katılarda da depolanabilmektedir. Suyun yüksek buhar basıncı ve diğör sıvıların kullanılabilirliğinin sınırlı olması gibi sakıncalar, ısı, enerjisinin kayalar, metaller, beton, kum v.s. gibi katılarda duyulur ısı şeklinde depolanması ile ortadan bu sorun giderilebilir. Ayrıca katıların donma, kaynama ve kendi kaplarının dışına sızma gibi problemleri de yoktur. Katı ortamda ısı depolama için odun, beton, ateş tuğlası, cam, alüminyum ve saf demir gibi maddeler sıralanabilir.

3.1.3. İkili Ortamda Isı Depolama

Bu tür depolamada hem katı hem de sıvı ortamda ısı depolama işlemi yapılmaktadır. Katı ve sıvı duyulur ısı depolama maddeleri çeşitli şekillerde birleştirilebilir. Bunlardan bir tanesi, kaya dolu yatak ile su tankının birleştirildiği hibrid sistemdir. Kaya dolgu ile çevrilmiş su tanklı ikili depolama sistemleri güneş enerjisi ile yüzey ısıtma uygulamalarında kullanılmaktadır. İkili ortamda ısı depolama yöntemi için kullanılabilircek materyaller Tablo 3.1’de verilmiştir.

3.2. Gizli Isı Depolama

"Gizli ısı depolama" teriminden genellikle, istenilen sıcaklık aralığında ergiyip-katılarak faz değıştirilebilen materyallerde (FDM) ergime gizli ısısı şeklinde ısı depolama anlaşılr. Bu nedenle gizli ısı depolama, “ergime ısısı depolama” olarak da adlandırılır. Gizli ısı depolamada, katı-sıvı faz değışimi sırasında FDM tarafından soğurulan ve serbest bırakılan ısıdan yararlanılır. Atık ısıdan geri kazanım uygulamalarında, çalışan sistemden kazanılan ısı FDM 'de ergime gizli ısısı şeklinde depolanarak (genellikle katı-sıvı) faz değışimi gerçekleşir [3].

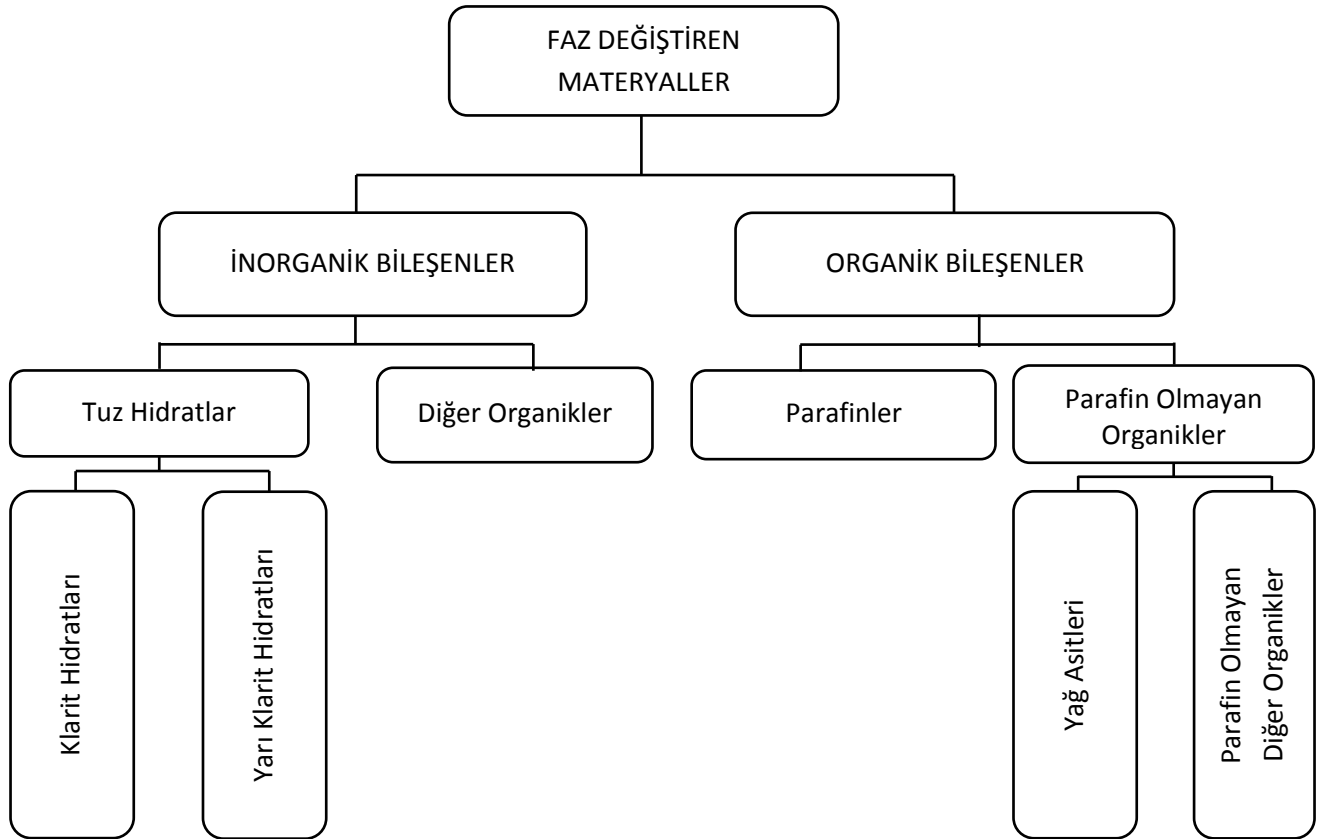
Gizli ısı depolamanın temel özelliği; FDM sıcaklığını 1 °C artırmak için gerekli ısı miktarıyla karşılaştırıldığında, katı materyalin ergitilmesi için, FDM 'nin birim ağırlığı başına fazla miktarda ısı gerekli olmasıdır. FDM tamamen ergitildikten sonra, eklenen her fazla ısı FDM 'nin sadece duyulur ısısını arttıracaktır. Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi duyulur ısıya göre daha küçüktür. Depolama ya da enerji dönüşümü için araştırma maliyeti düşüktür. Faz değıştiren maddeler (FDM) sabit bir

sıcaklık aralığında depolama olanağı sağlar ve erime sıcaklığına bağlı olarak hem ısıtma hem soğutma amaçlı kullanılabilirler [10].

Gizli ısı depolama yönteminin diğer ısı depolama yöntemlerine göre üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Duyulur ısı depolamayla karşılaştırıldığında, ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- Daha az ısı depolama materyali kullanıldığından ısı deposu hacmi daha azdır.
- FDM birim kütlelerinin ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta ısı depolama ve geri kazanma için uygundur.
- Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için yeterince uygundur.
- Büyük boyutlu ısı depolama sistemlerinde ekonomik olarak uygulanabilir.

Şekil 3.3'te faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sınıflandırmada görülmektedir ki öncelikle kendi aralarında organik ve inorganik bileşenler olarak sınıflandırılmaktadır. Gizli ısı depolama sistemlerinin temeli olan faz değişim maddeleri olarak çalışmalarda çoğunlukla parafinlerin ve tuz hidratların kullanımı daha yaygındır.



Şekil 3.3. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması

Gizli ısı depolama tekniğinde FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratlar aşağıdaki tabloda verilmiştir [7,23].

Tablo 3.3. FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratların termo-fiziksel özellikleri

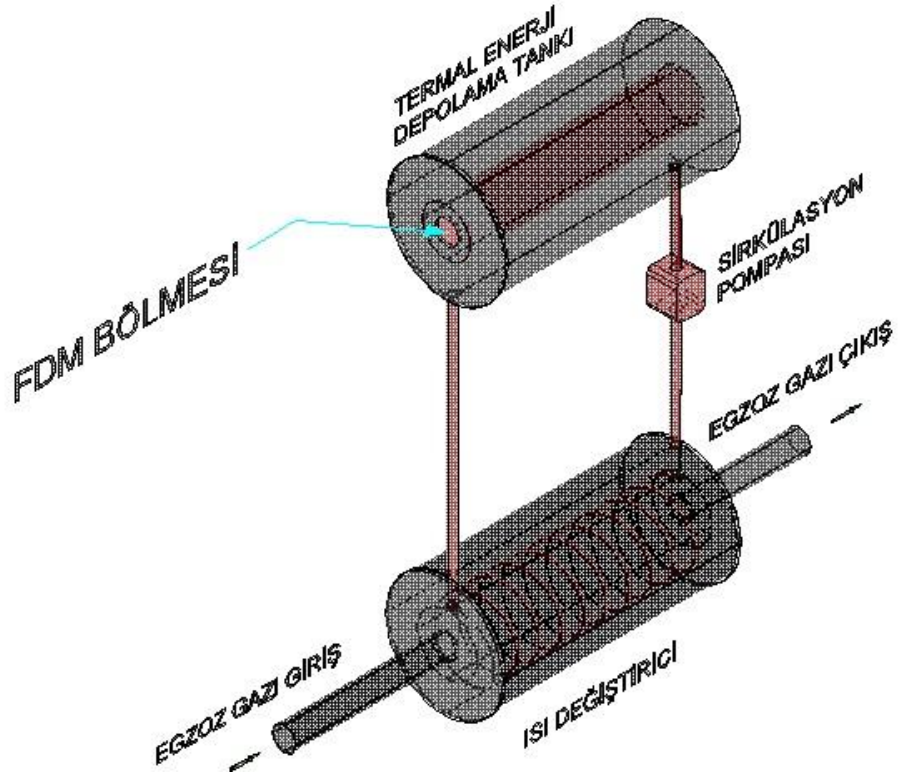
Tuz Hidratı	Erime Sıcaklığı (°C)	Ergime Isısı (kJ/kg)	Yoğunluk (kg/dm ³)	Özgül Isı kJ /kg K
CaCl ₂ .6H ₂ O (Kalsiyum klorit heksahidrat)	29.7	171	1.710(25°C) 1.469 (sıvı)	1.45
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O (Sodyum sülfat dekahidrat)	32.4	254	1.485	1.93
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O Disodyum biosfatdodekahidrat	35	281	1.520 (katı) 1.442 (sıvı)	1.70 (katı) 1.95 (sıvı)
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O Sodyum tiyosülfat pentahidrat	48	201	1.73 (katı) 1.67 (sıvı)	1.46 (katı) 2.93 (sıvı)
Ba(OH) ₂ .8H ₂ O Baryum hidroksit hidrat	78	267	2.180 (katı) 1.57 (20°C)	1.17(katı)
MgCl ₂ .6H ₂ O Magnezyum klorit hekza hidrat	116	165	1.442(78°C)	1.72 (katı) 2.82 (sıvı)

4. MATERYAL VE METOT

İçten yanmalı motorlar atık ısı depolamada veya ısı enerjisi depolama için en uygun sistemler arasında rahatlıkla gösterilebilir çünkü içten yanmalı motorların egzoz atık ısıları çok yüksek sıcaklıklarda çevreye atılmaktadır. Isı enerjisi depolama duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama sistemlerinin ayrı ayrı veya ikisinin birlikte kullanımı ile olmaktadır. Bu çalışmada duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama sistemi birleştirilerek egzoz gazı atık ısını çalışmaya uygun amaçla imal edilmiş bir ısı enerjisi depolama tankına egzoz gazı atık ısının depolanması ile deneyler yürütülmüştür.

4.1. Deney Sistemi

Deney setinin bir parçası olan dizel motorun egzoz gazı çıkışına yerleştirilmiş bir ısı değiştirici, birbirine entegre edilmiş gizli ısı ve duyulur ısı depolama ünitelerinden oluşan termal enerji depolama tankından oluşmaktadır. Ayrıca ısı değiştirici ve termal enerji depolama arasında suyun dolaşımını sağlamak için bir sirkülasyon pompası yerleştirilmiştir. Deney motorunu farklı devir sayılarında çalıştırmak ve farklı yükleme koşullarında çalıştırmak için dinamometreye sahip bir bremze tezgahı kullanılmıştır. Gizli ısı depolama ünitesi içinde faz değişim maddesi olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır. Isı transfer akışkanı olarak ve duyulur ısı depolama sistemi için su kullanılmıştır. Şekil 4.1'de deney setinde kullanılan ısı değiştirici ve termal enerji depolama tankının şematik olarak gösterilmek üzere çizimi verilmiştir. Şekil 4.2'de ise montajı yapılmış deney setinin kısımları belirtilerek gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Deney sisteminin bir kısmı olan ısı değıştirici ve TED tankı



Şekil 4.2. Deney sisteminin üstten görünüşü

Şekil 4.3’de deney motoru olan 1.9 dizel motorun bremze tezgahına bağlanmış hali ve depolama sisteminin belirli bir kısmı görülmektedir.



Şekil 4.3. Deney motorunun bremze tezgahına bağlanmış hali

4.2. Deney Motoru

Deneyle kullanılan 1.9 Multijet JTD dizel motor Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Bu dizel motorun maksimum devir sayısı 4000 dev/dk olup maksimum 200 Nm torkta çalışabilmektedir.



Şekil 4.4. Deneyde kullanılan dizel motor

Deneyde kullanılan dizel motor üretici firmanın kataloglarından, yetkili servislerinden ve eğitim amaçlı oluşturulan seminer kitapçıklarından faydalanılarak motor özelliklerinin bazıları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney motorunun bazı özellikleri

Silindir sayısı	4
Silindir konumu	Tek sıra
Motor tipi	Dizel
Zamanlama sistemi	Üstten tek eksantrik
Silindir çapı (mm)	82
Kurs mesafesi (mm)	90,4
Toplam silindir hacmi (mm ³)	1910
Maksimum güç (kW)	77
Maksimum güç (BHP)	105
Maksimum güçte motor devri (dev/dk)	4000
Maksimum tork (N.m)	200
Maksimum torkta motor devri (dev/dk)	1500
Rölanti devri (dev/dk)	850±20
Zamanlama kontrolü için boşluk (mm)	0.50
Subap ayar değerleri (emme-egzoz)	0.30 - 0.35

Deney motoru olan 1.9 Multijet JTD dizel motorda kullanılan yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. TÜPRAŞ 404 – Motorin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Sınır
Yoğunluk (15 °C)	kg/m ³	820-845	
Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar	% ağırlık	11	En çok
Parlama Noktası	°C	55	En az
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	°C		
Kış (a)		-15	En çok
Yaz (b)		5	En çok
Damıtma			
250 °C ‘ta elde edilen	% hacim	65	En çok
350 °C ‘ta elde edilen	% hacim	85	En az
% 95’in elde edildiği sıcaklık	°C	360	En çok
Kükürt	mg/kg	11-1000	
Karbon kalıntısı(%10 damıtma kal.)	% ağırlık	0,3	En çok
Viskozite (40°C’ta)	cst	2,0-4,5	
Bakır Şerit Korozyon (50°C’ta 3 saat)		No.1	En çok
Kül	% ağırlık	0,01	En çok
Setan Sayısı		51	En az
Setan İndisi	hesapla	46	En az
Su	mg/kg	200	En çok
Toplam Kirlilik	mg/kg	24	En çok
Oksidasyon Kararlılığı	g/m ³	25	En çok

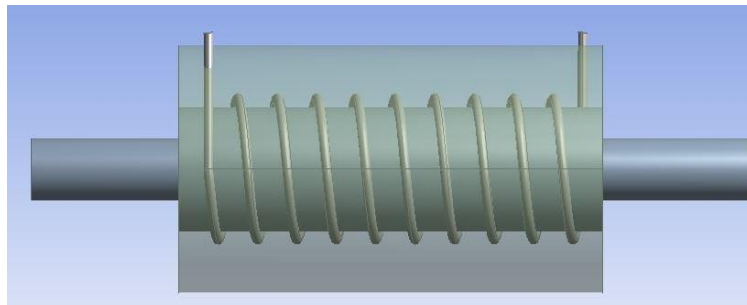
4.3. Egzoz Gazı Isı Değiştiricisi

Deney sisteminde dizel motorun egzoz gazı çıkışına eklenmiş egzoz gazı ısı değiştiricisi egzoz gazından aldığı ısıyı termal enerji depolama tankına sirkülasyon pompası aracılığıyla aktarmak için kullanılmaktadır. şekil 4.5 egzoz gazı ısı değiştiricisinin deney seti dışında montajı yapılmamış hali gösterilmektedir.



şekil 4.5. Montajı yapılmadan önce egzoz gazı ısı değiştiricisi

Egzoz gazı ısı değiştiricisi dış tarafı 22 cm çaplı 40 cm yüksekliğinde boyutlara ve ST37 malzemeye sahip silindirik bir parçadan oluşmaktadır. Egzoz gazı ısı değiştiricisi iç tarafı 10 cm çaplı 40 cm yüksekliğinde boyutlara sahiptir silindirik bir kısımdan ve dış tarafında 10 mm çapa sahip 13 sarımlı 450 cm uzunluğuna sahip spiral bakır borulardan oluşmaktadır. İki silindirik kısım ara boşluğunda ısıyı daha fazla tutabilmek adına torna kırıntısı ile tamamen doldurulmuştur. şekil 4.6’da ısı değiştiricinin şematik gösterimi verilmiştir.



şekil 4.6. Egzoz gazı ısı değiştiricisinin şematik gösterimi

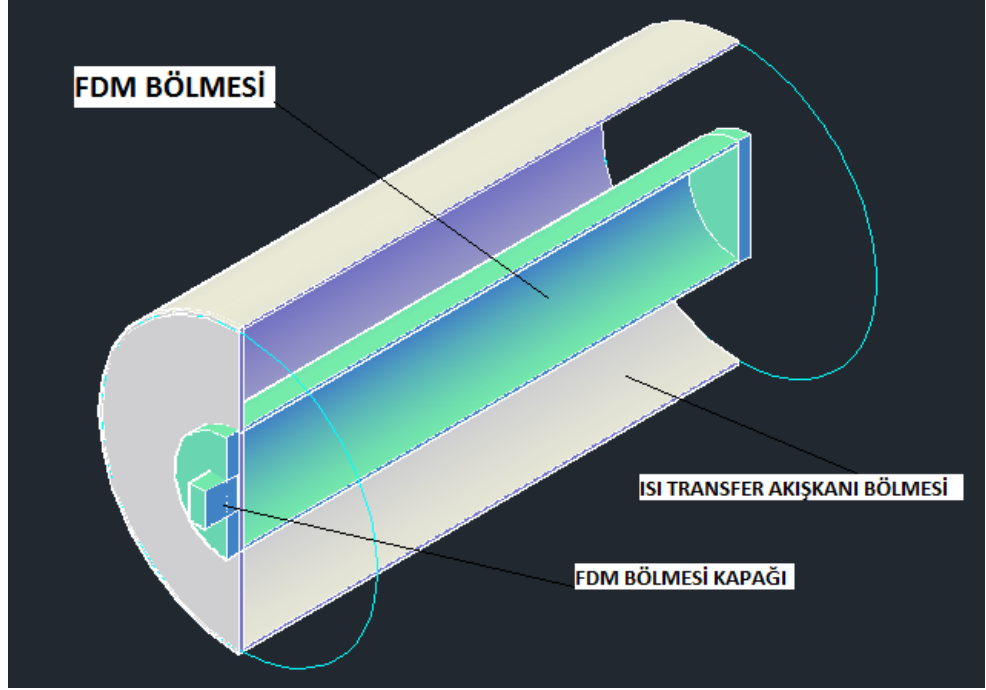
Isı değiştiricisinin imal aşamasında kullanımdan sonra tekrar sklebiyecek özelliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Isı değiştiricisi ile motor egzoz borusu i i geirilmış ve sızıntıların engellenmesi için kelepçelerle sağlamlaştırılmıştır. şekil 4.7’de egzoz gazı ısı değiştiricisi dizel motor egzoz borusuna bağlanmış halde görülmektedir. Isı değiştiricisi cam yn ile sarılmış ve alüminyum folyo ile gerekli yalıtımı sağlanmıştır.



şekil 4.7. Deney motoruna bağlı egzoz gazı ısı değiştiricisi.

4.4. Termal Enerji Depolama Tankı ve Kullanılan Faz Değişim Maddesi

Faz değişim maddesinin içinde bulunduğu termal enerji depolama tankı St37 malzemeye sahip 22 cm çapında, 40 cm yüksekliğinde ve 4 mm cidar kalınlığına sahip silindirik bir dış kısımdan oluşmaktadır. Faz değişim maddesinin bulunduğu kısım yaklaşık olarak hacmi 2 litre olup 8 cm çaplı ve 40 cm yüksekliğinde tam merkezlenmiştir. Faz değişim maddesinin sonradan eklenebilmesi için bir kapak oluşturulmuştur. şekil 4.8 ve şekil 4.9’da termal enerji depolama tankının kesiti ve depolama tankının yalıtım aşaması sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Termal enerji depolama tankı kesiti



Şekil 4.9. Yalıtımı yapılırken termal enerji depolama tankı

Şekil 4.10’da depolama tankının deney seti çalışır durumda iken depolama esnasında bir görseli verilmiştir.



Şekil 4.10. Deney sistemi üzerinde termal enerji depolama tankı

Bu çalışmada kullanılan faz değişim maddesi olan Kalsiyum Klorür Hekzahidratın bazı fiziksel özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Kalsiyum Klorür Hekzahidratın bazı fiziksel özellikleri

Erime sıcaklığı	29-34 °C
Yoğunluk (katı)	1800 kg /m ³
Yoğunluk (sıvı)	1560 kg /m ³
Depoladığı gizli ısı	190 kJ /kg
Isı iletim katsayısı (katı)	1.09 W /m ² K
Isı iletim katsayısı (sıvı)	1.54 W /m ² K
Yanıcılık ve zehirleyicilik	Yok
C _p _k (katı haldeyken özgül ısısı)	1.46 kJ /kg K
C _p _s (sıvı haldeyken özgül ısısı)	2.13 kJ /kg K

4.5. Sirkülasyon Pompası

Sirkülasyon pompası ayarlanabilir hız özelliğine sahip bir sıcak su pompasıdır. Üç tane hız seviyesi mevcuttur. Bu pompa basınçlı sıvılar içeren sirkülasyon sistemleri, sıcak ve soğuk su sirkülasyon sistemi, kapalı endüstriyel sirkülasyon sistemleri, klima sistemleri ve su kuleleri için bir basınçlı tedarik kaynağı olarak kullanılabilir. Şekil 4.11’de deneyde kullanılan sirkülasyon pompası gösterilmiştir.

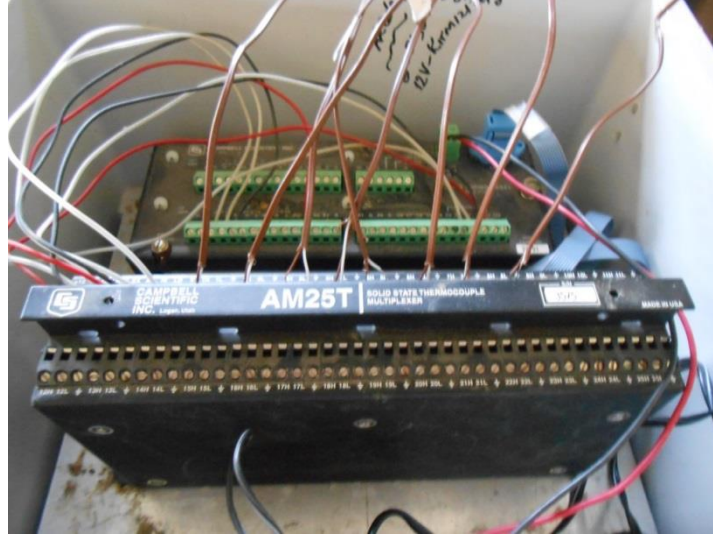


Şekil 4.11. Deney sisteminde kullanılan sirkülasyon pompası

Sirkülasyon pompasının üç kademeden oluşmaktadır ve bu kademeler 66 L/dk , 47 L/dk, 32 L/dk hacimsel debilerdir. Maksimum 1Mpa basınç şartlarında çalışabilmektedir.

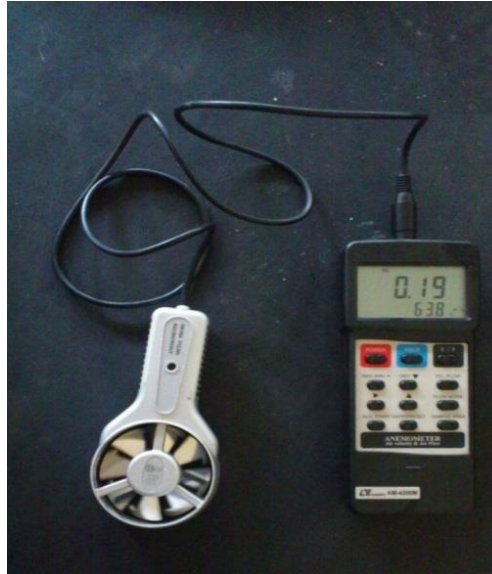
4.6. Data-Logger ve Anemometre

Data-logger, Campell Scientific INC. (25 kanallı) AM25T modelindedir. Data-Logger 12V 7Ah ‘lik akü ile çalışmaktadır. Deneylerde kullanılan Data-Logger, ısı çiftlerinin bağlı olduğu durumdaki bir görseli Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Deney süresince kullanılan Data-logger

Anemometre, deney süresince egzoz gazı çıkış hızını ölçmek ve çıkış sıcaklığını kontrol amaçlı kullanılmıştır. Anemometre, hız ölçümünde 0.01 m/s 'lik hassasiyete sahiptir. Ayrıca ölçüm cihazının sıcaklık ve hız ölçümlerinin alındığı kısım olan pervane metal olduğundan çok yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir.



Şekil 4.13. Deneyde kullanılan anemometre

Şekil 4.14'te termal enerji depolama tankı ve egzoz gazı çıkışına eklenmiş ısı değiştiricinin dizel motora bağlanmasının şematik gösterimi verilmiştir. Ayrıca enerji ve ekserji analizlerinin yapılabilmesi için deney düzeneğinin gerekli kısımlarına yerleştirilmiş termokupllar yani ısı çiftlerin yerleri gösterilmiştir.

4.7. Çalışmada Kullanılan Enerji ve Ekserji Denklemleri

Enerji ve ekserji denklemleri, enerji ve ekserji analizlerinin yapılması için literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak elde edilmiştir [2, 15, 23].

Deney aşamasında enerji ve ekserji analizleri yapılırken bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmektedir.
- Egzoz gazlarının özgül ısısı sıcaklığa bağlı olarak alınmaktadır.
- Yanma ürünleri hava gibi ideal gaz olarak alınmaktadır.
- Dış ortam sıcaklığı ortalama 24 °C olarak alınmaktadır.

İdeal gaz olarak kabul edilen egzoz gazının özgül ısısı sıcaklıkla değişimi aşağıdaki denklemden hesaplanabilir [11,15].

$$c_p = 28.11 + 0.1967 \times 10^{-2}T + 0.4802 \times 10^{-5}T^2 - 1.966 \times 10^{-9}T^3 \quad (4.1)$$

4.7.1. Enerji analizi

Termodinamiğin birinci yasası bir sistemde enerjinin bir şekilden diğerine dönüşümü ile ilgilidir ve bu dönüşümler sonucunda sistemin toplam enerjisinin değişmeyeceğini ifade eder. Bu yasa enerjinin korunumu ilkesi olarak ta adlandırılmaktadır. Bu yasaya göre enerji yoktan var, vardan da yok edilemez, ancak şekil değiştirebilir. Buhar makineleri, diğer ısı üretim makineleri ve yakıtlı motorlar hepsi bu yasanın öngördüğü şekilde enerjinin işe dönüştürülmesinden faydalanarak çalışmaktadır [15]. Enerji korunum ilkesi göz önüne alındığında dizel motor enerji denklemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Dizel motor yakıtı olan motorinin bulundurduğu enerji:

$$E_y = \dot{m}_y \times H_U \quad (4.2)$$

Egzoz gazının taşıdığı enerji:

$$E_{eg} = \dot{m}_{eg} \times c_{p,eg} \times (T_1 - T_0) \quad (4.3)$$

Isı değiştiricisinden kazanılan enerji:

$$E_{ID} = \dot{m}_{eg} \times c_{p,eg} \times (T_1 - T_2) \quad (4.4)$$

Motor soğutma suyunun üzerinde kaybolan enerji:

$$E_{ss} = \dot{m}_{ss} \times c_{p,ss} \times (T_4 - T_3) \quad (4.5)$$

şarj etme süresince tankta toplam depolanan enerji (L: Tuz hidratın gizli ısısı):

$$E_{s,t} = \frac{\{m_s \times c_{p,s} \times (T_{s,son} - T_{s,ilk}) + m_{fdm} \times L + m_{fdm} \times c_{p,fdm} \times (T_{fdm,son} - T_{fdm,ilk})\}}{\Delta t_s} \quad (4.6)$$

şarj etme verimi, ısı değiştiricisi tarafından geri kazanılan enerji depolama tankında depolanan enerji oranı;

$$\eta_s = \frac{\{m_s \times c_{p,s} \times (T_{s,son} - T_{s,ilk}) + m_{fdm} \times L + m_{fdm} \times c_{p,fdm} \times (T_{fdm,son} - T_{fdm,ilk})\}}{\dot{m}_{eg} \times c_{p,eg} \times (T_1 - T_2) \times t} \quad (4.7)$$

Toplam enerji verimi;

$$E_T = W_d + E_{s,t} \quad (4.8)$$

Dizel motorun enerji verimi;

$$\eta_d = W_d / E_y \quad (4.9)$$

Birleştirilmiş sistemin enerji verimi;

$$\eta_B = E_T / E_y \quad (4.10)$$

Kazanılan enerji:

$$E_k = \frac{\{m_s \times c_{p,s} \times (T_{s,s} - T_{s,i}) + m_{fdm} \times L + m_{fdm} \times c_{p,fdm} \times (T_{fdm,son} - T_{fdm,ilk})\}}{\dot{m}_f \times H_U \times t} \quad (4.11)$$

4.7.2. Ekserji analizi

Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin kalitesi olduğunu ve gerçek hal değişimlerinin enerji kalitesinin azalması yönünde olacağını ifade etmektedir. Enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade etme çabaları ekserji veya kullanılabilirlik adı verilen bir özelliğin tanımlanmasını sağlamıştır. Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanır ve bir kaynaktan elde edilebilecek en yüksek işi ifade etmektedir. Bir hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak tanımlanır. Bir hal değişimi sırasında ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır veya tüketilen iş o kadar azdır. Bir sistemin performansı ekserji kayıplarının en aza indirgenmesi yoluyla maksimize edilebilmektedir. Ekserji analizi, ikinci yasaya dayanan bir termodinamik analiz olup, enerji sistemlerini ve hal değişimlerini gerçekçi ve anlamlı biçimde değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı mümkün kılmaktadır. Ekserji veya ikinci yasa verimleri gerçek sistem performansını maksimum performansla karşılaştırırken, ekserji analizi yardımıyla termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri bulunabilmektedir. Sistem performansının iyileştirilmesinde ve daha iyi tasarımların yapılmasında kullanılır [15]. Özetle ekserji maksimum iş veya kullanılabilirlik denilebilmektedir. Egzoz gazı atık ısı depolamalı dizel motorun ekserji analizi için gerekli denklemler aşağıda belirtilmiştir.

Yakıtın kimyasal varlığı:

$$A_f = 1.04 \times \dot{m}_y \times H_U \quad (4.12)$$

Isı değiştiricili egzoz gazının ekserji kaybı:

$$A_{eg} = \dot{m}_{eg} \times \{(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)\} \quad (4.13)$$

Isı değiştirici ile geri kazanılan ekserji:

$$A_{ID} = \dot{m}_{eg} \times c_{p,eg} \times \{(T_1 - T_2) - T_0 \times \ln(T_1/T_2)\} \quad (4.14)$$

Soğutma suyu ile kaybedilen ekserji:

$$A_{ss} = \dot{m}_{ss} \times c_{p,ss} \times \{(T_4 - T_3) - T_0 \times \ln(T_4/T_3)\} \quad (4.15)$$

Sistemde depolanan ekserji:

$$A_D = \frac{\{m_s \times c_{p,s} \times (T_{s,son} - T_{s,ilk}) - T_0 \times \ln(T_{s,son}/T_{s,ilk}) + m_{fdm} \times c_{p,fdm} \times [(T_{fdm,son}/T_{fdm,ilk}) - T_0 \times \ln(T_{fdm,son}/T_{fdm,ilk})] + m_{fdm} \times [(L - T_0)(L/T_{fd})]\}}{t} \quad (4.16)$$

Toplam yararlı ekserji:

$$A_T = W_d + A_D \quad (4.17)$$

Dizel motorun ekserji verimi:

$$\psi_d = \frac{W_d}{A_y} \quad (4.18)$$

Birleşmiş sistemin ekserji verimi:

$$\psi_b = \frac{A_T}{A_y} \quad (4.19)$$

5. BULGULAR

İçten yanmalı motorlar üzerinden kaybolan atık ısı bir ısı depolama sistemi konularak belirli bir kısmı kazanılabilmektedir. Deneylerde motor egzoz gazı üzerinden atılan ısıнын termal enerji depolama tankına depolanması amaçlanmıştır. Bu çalışmada bir dizel motor egzoz atık ısını belirli bir oranda geri kazanabilmek için birbirine entegre edilmiş gizli ısı ve duyulur ısı depolama sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Isı depolama sisteminin üzerinde bağlı olduğu dizel motor ve depolama sisteminin analizleri sabit devir sayısı ve farklı yük koşullarında yapılmıştır. Bu yüklemeler hidrolik bir dinamometre ile çalışan bir bremze tezgahı ile sağlanmıştır. Öncelikle deneyler 2000 dev/dk'lık devir sayısında ve 0 Nm'lik yük şartlarında yapılmıştır. Deneyler yapıldığında ortam sıcaklığı 24 °C olarak ölçülmüş ve deneyler esnasında referans durum olarak çevre alınmıştır. Deneyler 30 dakikalık periyotlarla yapılmıştır.

Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları ışığında sistemin analizinin yapılabilmesi için deney sisteminde sekiz farklı yerden alınan sıcaklık değerleri bir önceki bölümde belirlenen denklemlerde kullanılmıştır. Enerji ve ekserji analizleri için önceki bölümde belirlenen parametreler farklı yük şartları için hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de gösterilmektedir. Tablo 5.1'de enerji ile ilgili sonuçlar ve Tablo 5.2'de ise sistemin ekserji sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.1’ de termodinamiğin birinci kanunu ışığında yapılan enerji analizlerinin sonuçları tüm sistem için gösterilmektedir. Tablo 5.1’de yakıt enerjisinin yaklaşık olarak tüm yük şartlarında üçte biri atık ısı olarak kaybedildiği görülmektedir.

Tablo 5.1. Deney sisteminin enerji analizi

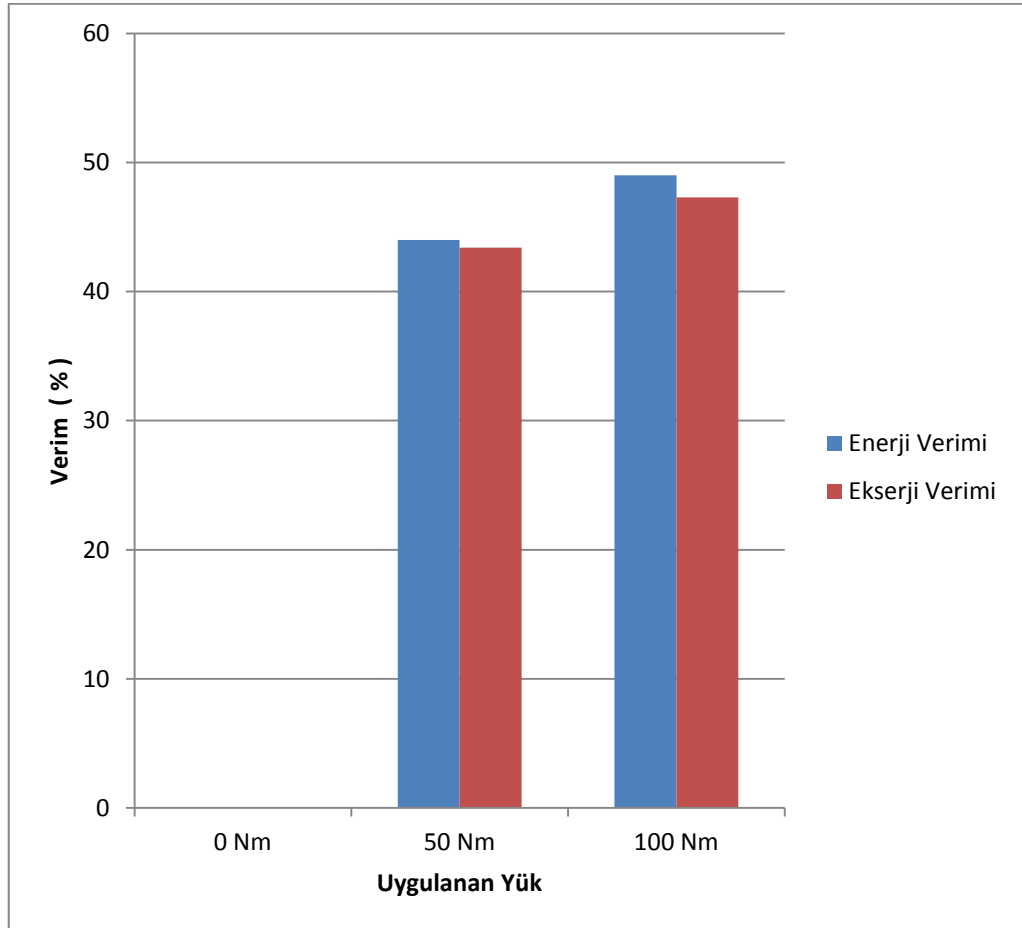
Özellik	Dizel Motora Uygulanan Yükler		
	0 Nm	50 Nm	100 Nm
Yakıtın enerjisi (kW)	16.03	34.07	50.10
Motor çıkış gücü (kW)	0	15,4	24.64
Egzoz gazı üzerinden kaybedilen enerji(kW)	2.94	4.80	5.60
Isı değiştirici ile kazanılan enerji (kW)	1.39	3.14	3.67
Soğutma suyu ile kaybedilen enerji (kW)	1.2	11.58	12.38
Depolanan enerji (kW)	1.209	1.487	1.790
Şarj etme verimi (%)	43.87	47.3	49
Yakıttan kullanılan toplam enerji (kW)	1.290	16.887	26.43
Dizel motor verimi (%)	0	45,2	49
Sistemin toplam verimi (%)	8	49.5	52.79

Tablo 5.2’de dizel motora 2000 devir/dk’lık devirde 0 Nm, 50 Nm ve 100 Nm’lik yükler uygulanarak sistemin tamamının ekserjisi ile ilgili sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Deney sisteminin ekserji analizi

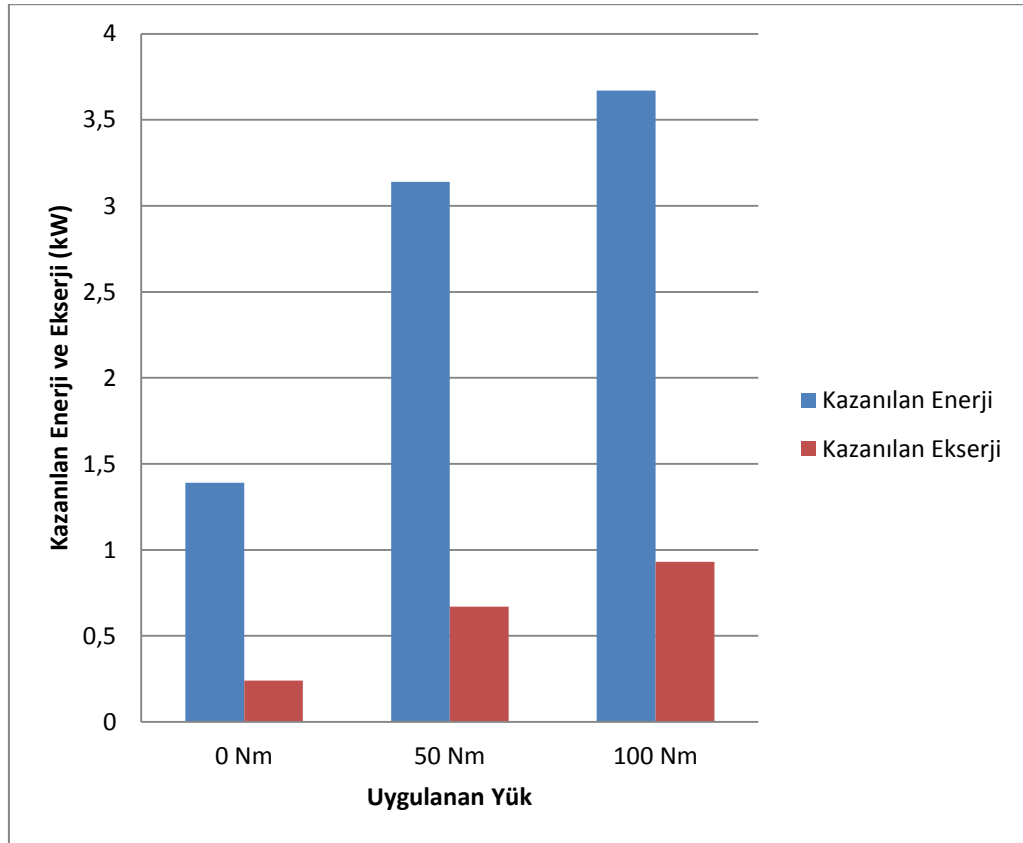
Özellik	Dizel Motora Uygulanan Yükler		
	0 Nm	50 Nm	100 Nm
Yakıtın ekserjisi (kW)	16.67	35.43	52.104
Egzoz gazından kaybedilen ekserji (kW)	0.406	1.343	1.84
Isı değıştirici ile kazanılan ekserji (kW)	0.24	0.67	0.93
Depolanan ekserji (kW)	0.081	0.124	0.179
Soğutma suyu ile kaybedilen ekserji (kW)	0.119	0.286	0.398
Sistemin toplam ekserjisi (kW)	0.119	15.524	24.819
Dizel motor ekserji verimi (%)	0	43.4	47.3
Sistemin toplam ekserji verimi (%)	0.7	43.8	47.6

Termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa göre önceki bölümde belirlenen parametreler yardımıyla hesaplanan değerler Şekil 5.1’de dizel motorun ekserji ve enerji verimleri arasındaki kıyaslama yapılmıştır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi dizel motorun enerji verimleri çok az da olsa ekserji verimlerinden daha yüksektir. Şekilde de görüldüğü gibi yük uygulanmadığında dizel motorun enerji ve ekserji verimleri sıfırdır.



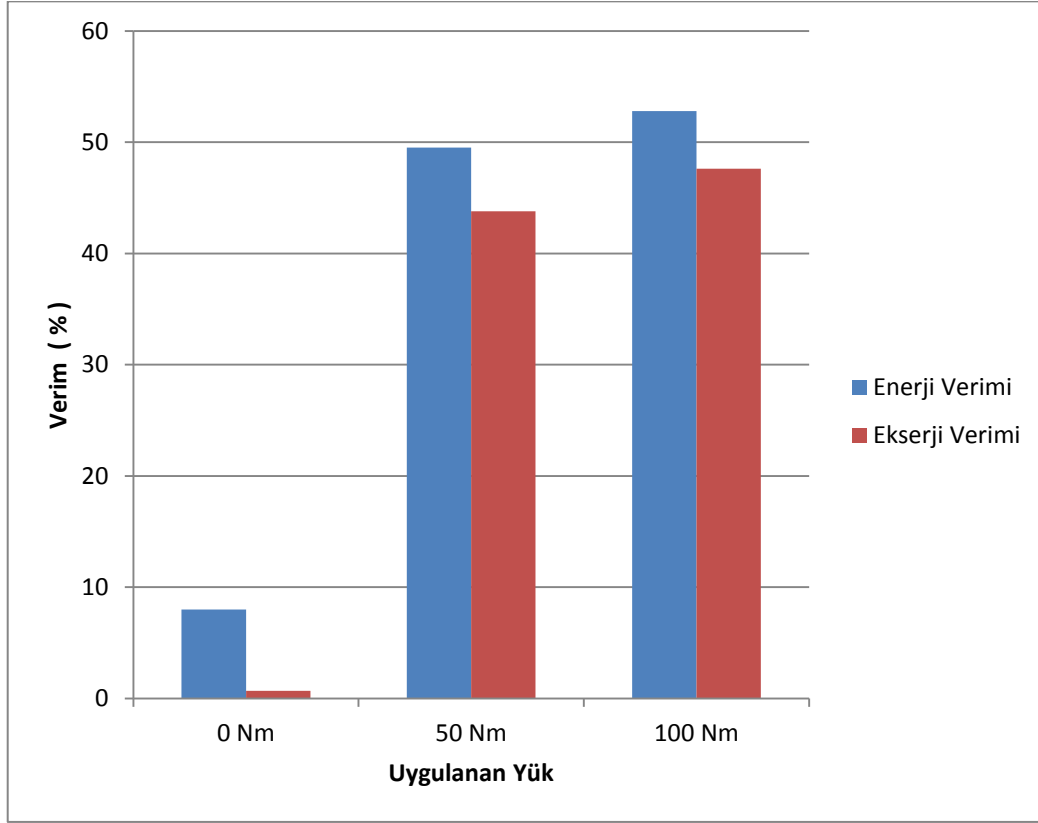
Şekil 5.1. Farklı yüklerde dizel motorun enerji ve ekserji verimi

Farklı yük koşullarında egzoz gazı ısı değıştircisi ile kazanılan enerji ve ekserji Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Yük uygulanmadığı durumda motor 2000 dev/dk devir sayısında egzoz gazından çevreye atık olarak gönderilecek olan 2.94 kW’lık ısınn ısı değıştircisi ile 1.39 kW miktarında ısı enerjisi geri kazanılmaktadır. 50 Nm’lik yük uygulandığında 3.14 kW değerde ısı enerjisi elde edilmektedir. 100 Nm’lik yük durumunda 3.67 kW değerde ısı elde edilmektedir.



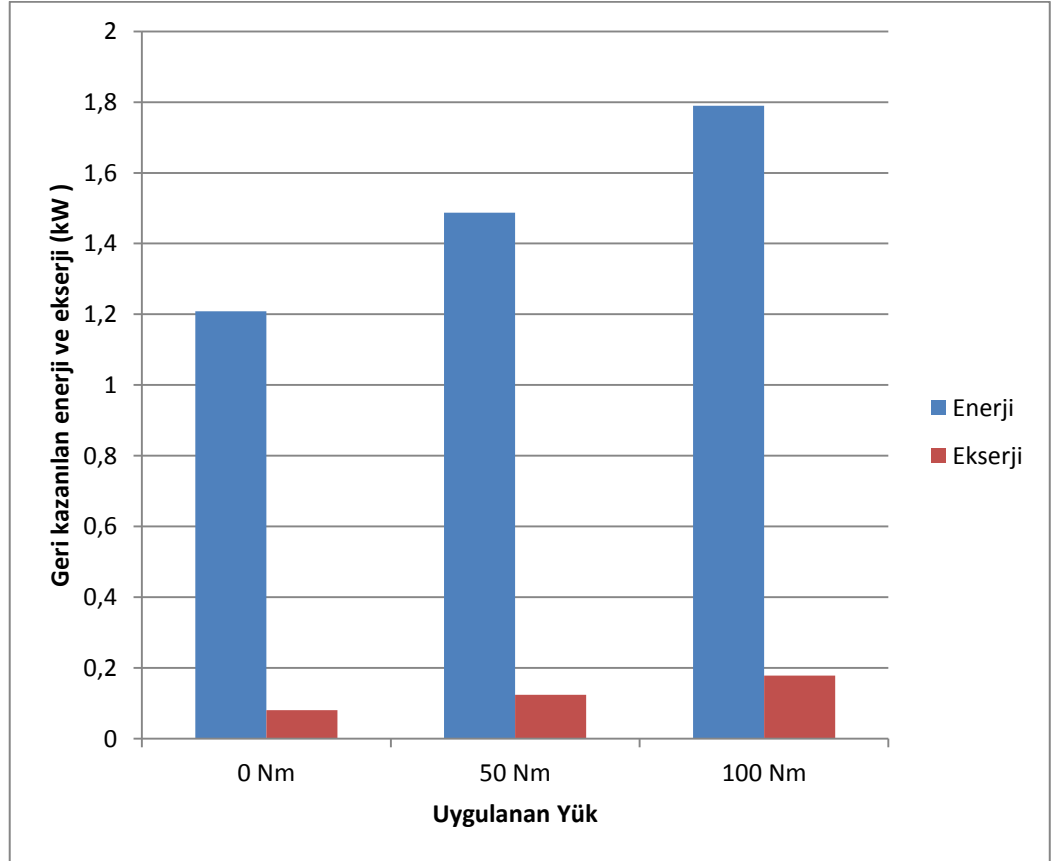
Şekil 5.2. Isı değıştirci ile geri kazanılan enerji ve ekserji

Isıl enerji depolamalı dizel motorun çeşitli yüklerdeki enerji ve ekserji verimleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu durumda sistemin enerji veriminin ekserji veriminden daha yüksek olduğu görülmektedir.



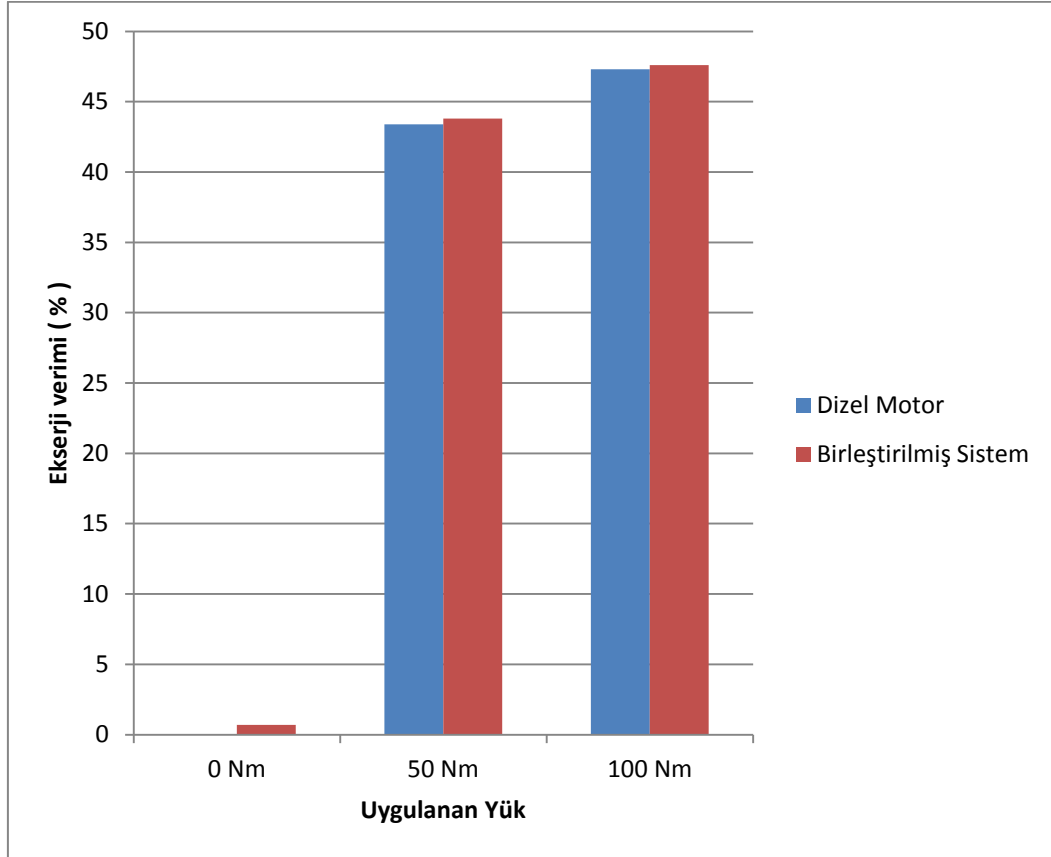
Şekil 5.3. Farklı yüklerde ısııl enerji depolamalı sistemin enerji ve ekserji verimi

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi geri kazanılan enerji ve ekserjinin yük arttıkça arttığı deneyler sonucunda elde edilmiştir. 2000 dev/dk çalışan dizel motorda 0 Nm , 50 Nm ve 100 Nm yük durumlarında geri kazanılan enerjiler sırasıyla 1.209 kW , 1.487 kW ve 1.79 kW olduğu belirlenmiştir. Aynı yük şartları için kazanılan ekserji ise sırasıyla 0.081 kW, 0.124 kW ve 0.179 kW olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Farklı yükleme durumlarına bağlı olarak geri kazanılan enerji ve ekserji

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi ısı depolama sistemi ilave edilen dizel motor sisteminin ekserji verimi ısı depolama sistemi olmadan dizel motor ekserji verimine göre daha yüksektir. Ayrıca 0 Nm’lik yükte dizel motorun ekserji veriminin sıfır olduğu ama ısı depolama sisteminin entegre edildiği dizel motor ekserji veriminin sıfır olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.5. Dizel motor ve birleştirilmiş sistemin ekserji verimleri

6. SONUÇLAR

Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu ile dizel motor ve ısı enerji depolama tankındaki enerjinin miktarı ve kalitesini analiz etmek mümkündür. Termodinamiğin birinci kanunu ile motor egzoz gazları ve motor soğutma suyu ile atılan enerjinin miktarı ölçülmüştür. Ayrıca enerjinin ne kadarlık bir kısmının depolanabildiği ölçülmüştür. Ekserji analizleri yapılarak sistemin enerjisindeki kullanılabilirlik analiz edilmektedir. Yük arttırıldıkça depolama tankını şarj etme verimi artmıştır. Yükleme durumlarına bağlı olarak yakıt halinde giren giriş enerjisi çıkışta sırasıyla % 7.5 , % 4.3 ve % 3.5'i ısı enerji deposuna depolanabilmiştir. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de görüldüğü gibi her yük şartı için ısı depolamalı sistemin verimi her zaman ısı depolama sisteminin bağlı olmadığı dizel motor veriminden daha yüksektir. Isı depolama sistemi olmadan çevreye motor yüksüz durumdayken ekserji kaybı 0.406 kW olup bu ekserji ısı değiştirici ile yaklaşık olarak %50' si kazanılıp ve ekserjinin ise ısı depolama tankına yarısı kadarı depolanabilmektedir. Fakat 50 Nm ve 100 Nm'lik durumlarda ısı değiştiricisinin kazandığı enerjinin yaklaşık olarak %20'si depolanabilmektedir. Deney sonuçlarına bağlı olarak motor soğutma suyu üzerinden atılan ısının çok yüksek olduğu görülmektedir. Motor soğutma suyunun sahip olduğu ekserji yüksüz durumda depolanan ekserjiden daha düşük olduğu fakat diğer yük durumlarında motor soğutma suyunun sahip olduğu ekserji depolanan ekserjiden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Spiral borulu ısı değiştirici tüm yük durumları için ortalama olarak %60'a yakın bir verime sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu verimin yükselmesinin sebebinin spiral boru ile egzoz gazı arasına konulan metal torna kırıntısının olduğu düşünülmektedir. FDM maddesinin ergime sıcaklığının düşük olması dezavantaj olarak görülmüştür ama gizli ısı depolama kapasitesi yüksek olan bir tuz hidrat olması ve ekonomik olması avantaj haline getirmiştir. Isı depolama sistemlerinin içten yanmalı motorlar üzerine uygulanması ile bu motorların verimlerinin artması, yapılan enerji ve ekserji analizleri ile ne kadar faydalı olabileceği görülmüştür.

7. ÖNERİLER

Egzoz gazı atık ısınıı daha fazla geri kazanabilmek için egzoz gazı ısı değiştiricisi geliştirilebilir. Faz değişim maddesi gizli ısı depolama kapasitesi daha yüksek olan ve yoğunluğu düşük olan bir parafin veya tuz hidrat seçilebilir. Yapılan analizler sadece şarj periyodu için yapılmış olduğundan, sistemin deşarj periyodu sırasında enerji ve ekserji analizi yapılabilir. Sıcaklık ölçüm aralıkları azaltılabilir. Ayrıca bu çalışmada ideal gaz olan hava gibi alınan egzoz gazı, yapılacak çalışmalarda yanma sonu ürünlerinin her birinin özgül ısıları hesaplanarak egzoz gazının özgül ısısı hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Pandiyarajan, V., Chinnappandian, M., Raghavan, V. and Velraj, R.,** 2011. Second law analysis of diesel engine waste heat recovery with a combined sensible and latent heat storage system, *Energy Policy* 39 ,6011-6020.
- [2] **Nantha Gopal, K., Subbarao, R., Pandiyarajan, V. and Velraj, R.,** 2010 Thermodynamics Analysis of a Diesel Engine Integrated with a PCM Based Energy Storage System, *Int. J. of Thermodynamics*. Vol. 13 (1), 15-21.
- [3] **Öztürk, H.,** 2008. Isı Depolama Tekniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- [4] **Pandiyarajan, V., Chinnappandian, M., Malan, E., Velraj, R. and Seeniraj, R.V.,** 2011. Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy* 88 (1), 77–87.
- [5] **Paksoy , H., Evliya, H., Turgut, B., Mazman, M., Konuklu,Y., Gök, Ö., Yılmaz, M.Ö., Yılmaz, S., Beyhan, B. ve Şahan, N.** Alternatif Enerji Kaynaklarının Termal Enerji Depolama ile Değerlendirilmesi.
- [6] **Yılmazoğlu, M. Z.,** 2010. Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması, *Politeknik Dergisi*, Cilt 13 (1) , 33-42 .
- [7] **Zalba, B., Marin, J., Cabeza, L.F. and Mehling, H.,** 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 23 251-283.
- [8] **Mazman, M.,** 2006 . Gizli ısı depolaması ve uygulamaları, Doktora Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Ens., Adana.
- [9] **Günerhan, H.,** 2004. Duyulur ısı depolama ve bazalt taşı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 540.
- [10] **Öztürk, H.H.,** 2005 Güneş Enerjisinin Gizli Isı Tekniği ile Depolanması, *Mühendis ve Makine Dergisi*.

- [11] **Ghazikhani, M., Hatami, M., Ganji, D.D., Gorji –Bandpy, M., Behravan, A. and Shahi, G.** 2014. Exergy recovery from the exhaust cooling in a DI diesel engine for BSFC reduction purposes, *Energy* 65, 44-51.
- [12] **Matami, M., Ganji, D.D. and Gorji-Bandpy, M.,** 2014. A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 168–181.
- [13] **Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. and Buddhi, D.,** 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
- [14] **Salman, S., Çınar, C., Topgül, T. ve Haşimoğlu, C.,** 2002 . Bir dizel motorunda egzoz gazları, soğutma suyu ve sürtünmeler yoluyla kaybedilen ısı enerjisinin belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, cilt:5 sayı:3 s.233-236.
- [15] **Çengel Y. ve Boles M.,** 2008, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Güven Bilimsel Kitabevi, İzmir.
- [16] <http://www.bilgiustam.com/isi-degistirgecleri-cesitleri-ve-ozellikleri/> 04.05.2014
- [17] <http://biyokure.org/isi-degistirici-cesitleri/7009/> 26.05.2014
- [18] www.isidegistirici.cjb.net 24.01.2014
- [19] <http://gigaom.com/2011/08/03/brightsource-energy-to-offer-solar-salt-storage-too/> 03.06.2014
- [20] <http://www.atakmuh.com/urun-gruplari/isi-esanjorleri/plakali-isi-esanjorleri/> 06.05.2014
- [21] **MEGEP,** 2008. Borulu Isı değiştiriciler, Kimya Teknolojisi, Ankara.
- [22] http://cbs.grundfos.com/turkey/lexica/AC_Cross_flow_heat_exchanger.html# 02.06.2014
- [23] **Kotas T.J.,**1995, The Exergy Method of Power Plant Analysis, Reprint Edition, Krieger, NewYork.
- [24] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Termokupl>

- [25] **Öztürk, H.H., 2005.** Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating, *Energy Conversion and Management*, 46, 1523-542.

ÖZGEÇMİŞ

EMRAH ÖZDEMİR, 11.12.1988 tarihinde Erzurum'un Köprüköy ilçesinde doğdu. İlkokulu Kars'ın Digor ilçesinin Atatürk İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Ortaokulu Kars ilinde Atatürk İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2001 yılında Kars Alpaslan Lisesinde başladığı lise eğitimini 2005 yılında bitirdi. Üniversite eğitimine 2006 yılında Fırat Üniversitesi Makine Eğitimi bölümünün Otomotiv Öğretmenliği programında başlayarak 2010 yılında başarıyla bitirip mezun oldu. Şu an yüksek lisans öğrencisi olarak Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü'nde Enerji Anabilim Dalı'nda eğitim görmektedir. Ayrıca Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği tamamlama programına 2013 yılında başlayıp halen devam etmektedir. 2012 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Enerji Sistemleri Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak başlayıp halen çalışmaya devam etmektedir.