

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KONVANSİYONEL VE ATIK ISI KAZANLARDA BUHAR  
ÜRETİMİ SÜRECİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİ**

**ÇAĞATAY YAYLACI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2015**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KONVANSİYONEL VE ATIK ISI**  
**KAZANLARDA BUHAR ÜRETİMİ SÜRECİNİN**  
**ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİ**

**ÇAĞATAY YAYLACI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. MAHMUT BAYRAMOĞLU**

**GEBZE**  
**2015**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF STEAM  
PRODUCTION PROCESS IN CONVENTIONAL  
AND WASTE HEAT BOILERS**

**ÇAĞATAY YAYLACI**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**PROF. DR. MAHMUT BAYRAMOĞLU**

**GEBZE**  
**2015**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/06/2015 tarih ve 2015/38 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Çağatay Yaylaçlı'nın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE  
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE : Prof. Dr. Tuncer ERCİYES

ÜYE : Prof. Dr. Hasan SADIKOĞLU

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu çalışmada, enerji sektörünün en önemli donanımlarından biri olan gaz türbini, atık ısı kazanı, konvansiyonel kazan ve buhar türbinlerinden oluşan TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi kuvvet santrali ünitesinin simülasyon modeli Aspen HYSYS programı kullanılarak hazırlandı. Sistemin ekserji analizi yapılarak ekserji veriminin optimizasyonu yapıldı. Simülasyon çalışmasının sonucunda elde edilen entalpi değerlerini doğrulamak amacıyla kütle, enerji ve ekserji değerleri el ile tekrar hesaplandı. Elde edilen veriler kullanılarak sistemin enerji verimi incelendi. Sonuçlar incelendiğinde kondenser hariç ekipmanların enerji verimlerinin % 95 ile % 98 arasında olduğu görüldü. Bu sonuç ekserji verimleri ile kıyaslandığında iki değer arasında korelasyon olmadığı görüldü. Sistemde bulunan atık ısı kazanının modernizasyonu sonrasında değişen ekserji verimi incelendi ve eski durumla karşılaştırıldı. Öncelikle, mevcut durumda sistemin ekserji verimi % 53 olarak hesaplandı; Sistemde toplam ekserji kaybı 126 MW olup bu kaybın % 43'ü konvansiyonel kazandan, % 31'i ise gaz türbini yanma odasından kaynaklanmaktadır. Daha sonra, sistemde iyileştirme çalışmaları kapsamında, destek yanmalı atık ısı kazanına geçiş yapılması ve parametrelerin optimize edilmesi sonucunda ekserji veriminin % 62'ye çıktığı, toplam ekserji kaybının ise 104 MW'a düştüğü görüldü. Yeni durumda da ekserji verimi açısından en verimsiz ekipmanların atık ısı kazanı ve gaz türbini yanma odası olduğu bulundu. Tezin optimizasyon çalışması bölümünde; 4 adet değişken, 2 adet kısıtlayıcı kullanılarak amaç fonksiyonu olarak belirlenen ekserji veriminin maksimizasyonu hedeflendi. Optimizasyon işlemi için Aspen PLUS paket programında mevcut Lagrange çarpanları kullanıldı.

**Anahtar Kelimeler: Enerji, Ekserji, Kojenerasyon, Optimizasyon, Simülasyon.**

## SUMMARY

In this work, the power plant of TÜPRAŞ İzmit Refinery is considered and the simulation study of the unit is performed. The mass and energy balances are set up and exergy losses of the system are analyzed. The simulation model of the system is set up by using Aspen HYSYS software. Mass and energy balance are calculated by hand in order to check the enthalpy results taken from the simulation software. Energy efficiency of the equipment are calculated and the results are compared with the exergy efficiency results. It is seen that the energy efficiency of the equipment are between %95-%98. The relation between energy and exergy efficiency is investigated but it is seen that there is no correlation between two terms. The heat recovery steam generator in the existing system is upgraded to supplementary firing type and the effect of this modernization is investigated by means of exergy analysis. Aspen PLUS software is used for the optimization work which is the final stage of the study. The exergetic efficiency of the system before supplementary firing boiler was evaluated as %53. Total exergy loss of the system was 126 MW %43 of this loss caused from conventional boiler and the %31 from combustion chamber of the gas turbine. After modernization of the boiler and optimizing the parameters the exergetic efficiency increased to %62. With the supplementary fired heat recovery steam generator, the exergy loss of the system drop by 22 MW to 104 MW. In the optimization part of the thesis; the objective function, variables and the constraints are introduced to the program. The objective function is to maximize the exergetic efficiency of the overall system. 4 variables and 2 constraints are selected. Lagrange multiplier method is used for the optimization of the system.

**Key Words: Energy, Exergy, Cogeneration, Optimisation, Simulation.**

## TEŞEKKÜR

Tüm hayatım boyunca bana maddi, manevi her türlü desteği veren ve bu günlere gelmemi sağlayan aileme,

TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi'nde çalışırken aynı zamanda yüksek lisans öğrenimi yapmama ve rafineri olanaklarından faydalanarak tez çalıŐmamı tamamlamama olanak sağlayan değerli yöneticilerim Sn. İlyas Çelik ve Sn. Pınar ÇaędaŐ Duran'a,

İlk işyerim Çolakoğlu Metalurji A.Ő'de çalışırken yüksek lisans eğitimime başlama ve devam ettirme Őansı tanıyan Sn. A. Fikret Gen'e,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca benimle değerli bilgilerini paylaŐan ve her konuda yardımcı olan danıŐman hocam Prof. Dr. Mahmut Bayramoğlu'na teŐekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| ÖZET   | v                   |
| SUMMARY  | vi                  |
| TEŞEKKÜR   | vii                 |
| İÇİNDEKİLER  | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                 | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ  | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ  | xiii                |
| <br>   |                     |
| 1. GİRİŞ   | 1                   |
| 2. KOJENERASYON PROSESİ  | 2                   |
| 2.1. Gaz Türbini   | 4                   |
| 2.2. Atık Isı Kazanı ( HRSG )                                  | 5                   |
| 2.3. Degazör   | 6                   |
| 2.4. Konvansiyonel Kazan                                       | 9                   |
| 2.5. Buhar Türbini   | 10                  |
| 3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI  | 12                  |
| 3.1. Komponent Seçimi  | 12                  |
| 3.2. Akışkan Paketi Seçimi ve Hal Denklemleri                  | 12                  |
| 3.3. Reaksiyon Tanımı  | 13                  |
| 3.4. Proses Simülasyon Çalışması                               | 13                  |
| 3.4.1. Gaz Türbini Simülasyon Modeli                           | 14                  |
| 3.4.2. Atık Isı Kazanı Simülasyon Modeli                       | 15                  |
| 3.4.3. Degazör ve Kazan Besleme Suyu Sistemi Simülasyon Modeli | 16                  |
| 3.4.4. Konvansiyonel Kazan Simülasyon Modeli                   | 17                  |
| 3.4.5. Buhar Türbini Simülasyon Modeli                         | 17                  |
| 3.5. Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri                      | 18                  |
| 3.5.1. Enerji Denklikleri                                      | 18                  |
| 3.5.2. Ekserji Denklikleri                                     | 19                  |
| 4. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI SONUÇLARI                              | 20                  |
| 4.1. Kütle ve enerji denklikleri                               | 20                  |



|  |    |
|--|----|
| 4.2. Özet Akım Tablosu   | 21 |
| 4.3. Özet Ekipman Tablosu  | 26 |
| 4.4. Destek Yanmalı Atık Isı Kazanına Geçiş ve Ekserji Kıyaslaması | 29 |
| 4.4.1. Destek Yanmalı Atık Isı Kazanı                              | 30 |
| 5. OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI SONUÇLARI                                | 35 |
| 5.1. Optimize Edilen Sistemin Simülasyonu                          | 35 |
| 5.2. Optimizasyonda Kullanılan Parametreler ve Özellikler          | 36 |
| 5.3. Optimizasyonun Amaç Fonksiyonu                                | 37 |
| 5.4. Optimizasyonda kullanılan Kısıtlamalar                        | 38 |
| 5.5. Optimizasyon Değişkenleri                                     | 39 |
| 5.6. Optimizasyon Sonuçları  | 39 |
| 6. GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR                                 | 41 |
| <br>   |    |
| KAYNAKLAR  | 43 |
| ÖZGEÇMİŞ   | 45 |
| EKLER  | 46 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler ve</u> | <u>Açıklamalar</u>                            |
|--------------------|---|
| <u>Kısaltmalar</u> |   |
| $\Delta E_k$       | : Kinetik enerji değişimi                     |
| $\Delta E_p$       | : Potansiyel enerji değişimi                  |
| $\Delta H$         | : Entalpi değişimi                            |
| $C_p$              | : Isı sığası                                  |
| $E$                | : Toplam ekserji                              |
| $E^{CH}$           | : Kimyasal ekserji                            |
| $E_D$              | : Yok edilen ekserji                          |
| $E_i$              | : Giriş akışkanındaki ekserji                 |
| $E^{KN}$           | : Kinetik ekserji                             |
| $E_O$              | : Çıkış akışkanındaki ekserji                 |
| $E^{PH}$           | : Fiziksel ekserji                            |
| $E^{PT}$           | : Potansiyel ekserji                          |
| $E_Q$              | : Çevreyle ısı transferinden kaynaklı ekserji |
| $m_i$              | : Kütleli akış                                |
| $Q$                | : Isı enerjisi                                |
| $R$                | : Gaz sabiti                                  |
| $T_0$              | : Referans sıcaklığı                          |
| $W$                | : İş enerjisi                                 |
| $X$                | : Mol fraksiyonu                              |
| HKBS               | : HRSG su giriş entalpisi                     |
| HNG                | : Gaz türbini doğalgaz entalpisi              |
| HREF1              | : Doğalgaz referans entalpisi                 |
| HREF2              | : Buhar referans entalpisi                    |
| HREF3              | : Baca gazı referans entalpisi                |
| HRSG               | : Heat recovery steam generator               |
| HSTEAM             | : HRSG buhar çıkış entalpisi                  |
| LHV                | : Alt ısı değeri                              |
| MAIR               | : Hava akışı                                  |
| MNG                | : Gaz türbini doğalgaz akımı                  |

|         |   |  |
|---------|---|--|
| MNG2    | : | HRSG doğalgaz akımı                      |
| MSTEAM  | : | HRSG buhar çıkış akımı                   |
| MWT     | : | Gaz türbini elektrik retimi             |
| M1NG    | : | Gaz türbini doğalgaz akımı               |
| M1NG2   | : | HRSG doğalgaz akımı                      |
| M1STEAM | : | HRSG buhar çıkış akımı                   |
| SKBS    | : | HRSG su giriş entropisi                  |
| SNG     | : | Gaz türbini doğalgaz entropisi           |
| SREF1   | : | Doğalgaz referans entropisi              |
| SREF2   | : | Buhar referans entropisi                 |
| SREF3   | : | Baca gazı referans entropisi             |
| SSTEAM  | : | HRSG buhar çıkış entropisi               |
| TOUT    | : | Baca gazı sıcaklığı                      |
| TüPRAş  | : | Türkiye Petrol Rafineleri Anonim şirketi |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 2.1: Akış diyagramı.                                | 3                   |
| 2.2: Gaz türbini bölümleri.                         | 5                   |
| 2.3: Gaz türbini genel görünümü.                    | 5                   |
| 2.4: Atık ısı kazanı genel görünümü.                | 6                   |
| 2.5: Tepsi tipi degazör görünümü.                   | 8                   |
| 2.6: Spray tipi degazör görünümü.                   | 8                   |
| 2.7: Membran degazör görünümü.                      | 9                   |
| 2.8: Konvansiyonel kazanın genel görünümü.          | 10                  |
| 2.9: Turbin jeneratör sisteminin genel görünümü.    | 11                  |
| 2.10: Generatör genel görünümü.                     | 11                  |
| 3.1: Proses akış şeması.                            | 14                  |
| 3.2: Gaz türbini ünitesinin akış şeması.            | 15                  |
| 3.3: Atık ısı kazanı ünitesinin akış şeması.        | 16                  |
| 3.4: Degazör ve KBS ünitesinin akış şeması.         | 16                  |
| 3.5: Konvansiyonel kazan ünitesinin akış şeması.    | 17                  |
| 3.6: Buhar türbinleri ünitesinin akış şeması.       | 18                  |
| 4.1: Ekserji kayıp dağılımı.                        | 27                  |
| 4.2: Grassmann diyagramı.                           | 28                  |
| 4.3: Destek yanmalı atık ısı kazanı akış diyagramı. | 30                  |
| 5.1: Optimize edilen sistemin akış diyagramı.       | 35                  |

# TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                     | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 3.1: Seçilen komponentler.                                  | 12                  |
| 3.2: Seçilen hal denklemi paketleri.                        | 13                  |
| 4.1: Simülasyon çalışması kütle denkleği sonuçları.         | 20                  |
| 4.2: Simülasyon çalışması enerji denkleği sonuçları.        | 21                  |
| 4.3: Akım değerleri.  | 22                  |
| 4.4: Akım değerleri.  | 23                  |
| 4.5: Akım değerleri.  | 24                  |
| 4.6: Akım değerleri.  | 25                  |
| 4.7: Ekipman ekserji hızı sonuçları.                        | 26                  |
| 4.8: Ekserji kayıp sıralaması.                              | 27                  |
| 4.9: Enerji ve ekserji verimi kıyaslaması.                  | 29                  |
| 4.10: Normal ve destek yanmalı atık ısı kazanı kıyaslaması. | 31                  |
| 4.11: Destek yanmalı atık ısı kazanı akım değerleri.        | 33                  |
| 4.12: Destek yanmalı atık ısı kazanı akım değerleri.        | 34                  |
| 5.1: Optimizasyonda kullanılan proses parametreleri.        | 36                  |
| 5.2: Optimizasyonda kullanılan özellikler.                  | 36                  |
| 5.3: Optimizasyonda kullanılan kısıtlamalar.                | 38                  |
| 5.4: Optimizasyon değişkenleri.                             | 39                  |
| 5.5: Optimizasyon sonuçları.                                | 39                  |
| 5.6: Optimizasyon iterasyon sonuçları.                      | 40                  |

# 1. GİRİŞ

Birincil yakıt rezervlerinin azaldığı ve küresel rekabetin arttığı günümüz ortamında enerji girdilerinde süreklilik, kalite ve asgari maliyetleri sağlamak, kaçınılmaz olmuştur. Son yıllarda enerji üretiminin giderek kritikleşmesi, üretici ve tüketicileri üretim proseslerini daha ayrıntılı incelemeye zorlamıştır. Ekserji analizi özellikle enerji üretim proseslerinde oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Proses tasarımı ve optimizasyonu yapılırken ekserji analizi yapılması sonucu iyileştirmeler yapılabilmekte ve işletmeler açısından bu iyileştirmeler oldukça yüksek maddi getiriler sağlamaktadır.

Fosil yakıtlı enerji üretim yöntemlerinden günümüzde en sık kullanılanları termik santraller ve doğalgaz santralleridir. Doğalgaz, gerek temiz olması gerekse yüksek ısıl değere sahip oluşundan dolayı tercih edilmektedir. Enerji santrallerinde verim hesabı veya kayıp analizleri yapılırken genellikle termodinamiğin 1.kanununa göre hesaplamalar yapılmaktadır. Ancak, daha ayrıntılı analiz için termodinamiğin 1. kanunu ile birlikte 2. kanunu da kullanılmalıdır. Bu tür analiz ekserji analizi olarak adlandırılmaktadır.

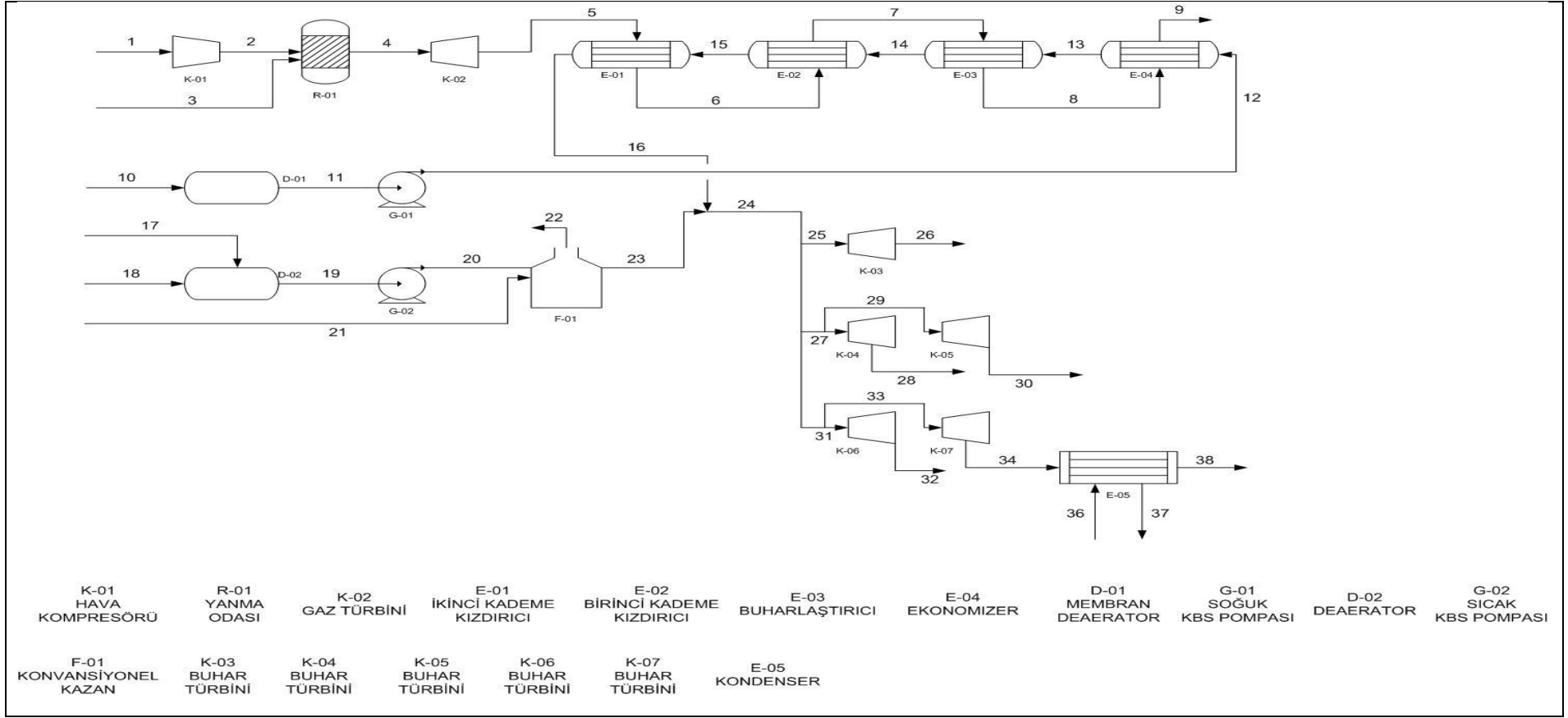
Ekserji; bir sistemden alınabilecek maksimum iş miktarını tanımlamaktadır. Sistemin çevresiyle termodinamik dengeye gelmesi durumunda bu sistemden daha fazla iş alınamayacaktır. Yapılan çalışmalarda ekserji genellikle fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir. Fiziksel ekserji, sistemin basınç ve sıcaklığına bağlı iken kimyasal ekserji ise sistemin kompozisyonu ile ilişkilidir.

## 2. KOJENERASYON PROSESİ

Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden beraberce üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik neticeler oluşturmaktadır. Basit çevrimde çalışan, yani sadece elektrik üreten bir gaz türbini ya da motoru kullandığı enerjinin % 30-40 kadarını elektriğe çevirebilir. Bu sistemin kojenerasyon şeklinde kullanılması halinde sistemden dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir bölümü de kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek toplam enerji girişinin % 70-90 arasında değerlendirilmesi sağlanabilir [1].

Enerji santrallerinde hedef maksimum elektrik üretimi olduğundan dolayı endüstride bulunan santrallerin daha çok kombine çevrim prosesi olduğu görülmektedir. Rafinerilerde ise; elektrik tüketimi nispeten orta çaplıdır. Ancak, elektrik enerjisinin yanında farklı basınç kademelerinde yüksek miktarda buhar tüketimi bulunmaktadır. Bu sebeple, rafinerilerde kombine çevrim santrali yerine kojenerasyon prosesi daha çok tercih edilmektedir.

TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi kojenerasyon ünitesi su tasfiye, gaz türbini, atık ısı kazanı, konvansiyonel kazan ve buhar türbinleri olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır. Ünitenin genel akış diyagramı Şekil 2.1' de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1: Akış diyagramı.



## 2.1. Gaz Türbini

Doğalgaz santrallerinin ana ekipmanı olan gaz türbinleri, enerji santrallerinin yanı sıra uçak motoru olarak da kullanılırlar. Uçak motoru olarak kullanılan gaz türbinleri aeroderivatif türü, rafineri kojenerasyon santrallerinde ise ağır yük tipi gaz türbinleri tercih edilmektedir. Bunun en büyük sebebi ise, ağır yük gaz türbinlerinin daha istikrarlı ve güvenilir olmasıdır.

Gaz türbinleri temel 3 bölüme ayrılır. Bunlar;

- Hava kompresörü
- Yanma odası
- Türbin

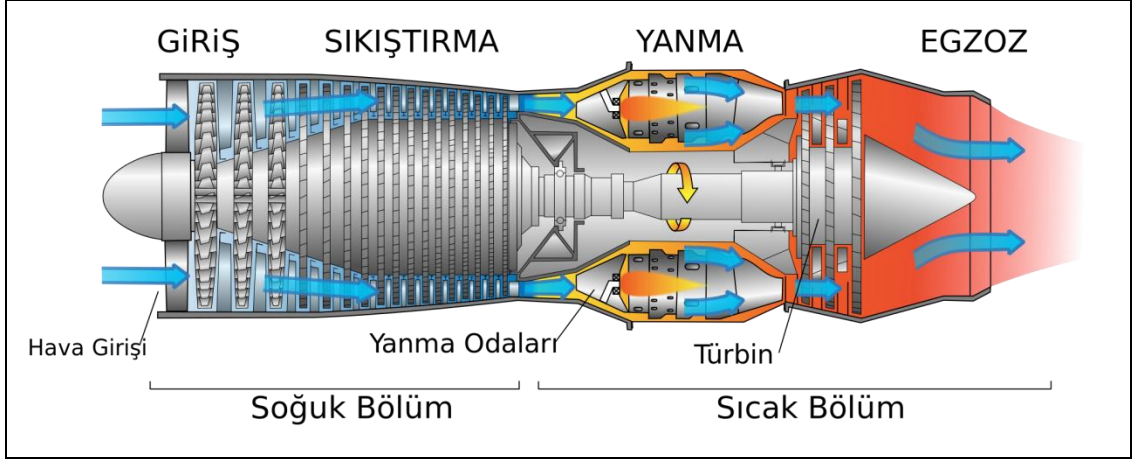
Şeklindedir.

Hava kompresörü atmosferden alınıp filtrelenen, opsiyonel olarak sıcak havalarda verimi artırmak adına buharlaştırıcı soğutucuda soğutulmuş havayı emip yaklaşık 11 bar'a basar. Kompresör çıkışında ısınan basınçlı hava doğalgaz ile birlikte yanma odasına girer. Kompresörün farklı kademelerinden, türbin tarafındaki farklı kademelerde soğutma yapılması amacıyla çekişler bulunmaktadır fakat tez kapsamında bu çekişler ihmal edilmiştir. Kompresör tam yükte yaklaşık 140 kg/s hava basmaktadır. Bu havayı basmak için türbinin ürettiği şaft gücünün yaklaşık yarısını kompresör kullanır.

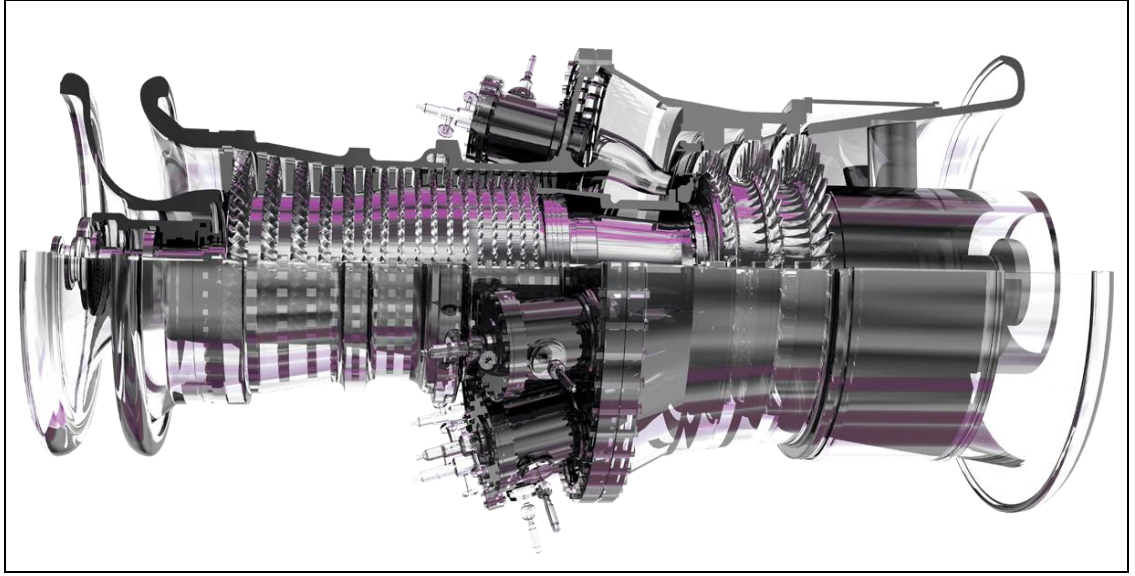
Yanma odasında ise, yakıt ile kompresörden gelen hava brülörlerde yakılarak yaklaşık 1100 °C' de hava üretilir. Bu sıcak hava türbine verilerek kanatların döndürülmesi sağlanır ve böylelikle şaft gücü üretilmiş olur.

Kompresör, gaz türbini ve generatör aynı şaft üzerinde bulunur. Türbinin ürettiği şaft gücünün belirli bir kısmı kompresörde tüketirken bir kısmı ise generatör tarafından elektrik enerjisine çevrilir [2], [3], [4].

Sistem ile ilgili ayrıntılı çizimler Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'de verilmektedir.



Şekil 2. 2: Gaz türbini bölümleri.



Şekil 2. 3: Gaz türbini genel görünümü.

## 2.2. Atık Isı Kazanı ( HRSG )

Gaz türbinleri elektrik üretmek amacıyla çok sık kullanılan ekipmanlar olmalarına karşılık tek başlarına çalıştıkları durumda ( simple cycle, basit çevrim ) verimleri %30-%40 arasında değişmektedir. Bunun en büyük sebebi ise türbin çıkışından 550-600 °C çıkan havanın atmosfere verilmesidir. Bazı sistemlerde türbin atık ısısı kullanılarak kompresör çıkışındaki hava ısıtılmakta ve verim artırılmaktadır. Ancak bu durumda bile çevreye salınan hava sıcaklığı 300-350°C' nin altına düşmemektedir.

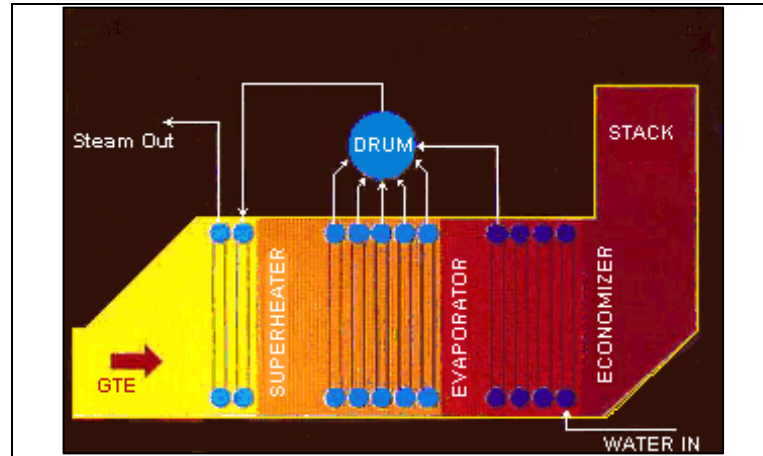
Gaz türbinlerinin bu düşük verimlerini artırmak amacı ile türbin çıkışlarına atık ısı kazanı ( HRSG, heat recovery steam generator ) kurulmaktadır. Bu kazan, türbin çıkışındaki atık ısıdan faydalanarak buhar üretmekte ve buhar sonrasında buhar türbinlerine şarj olarak verilmektedir.

Endüstride kullanılmakta olan farklı tür HRSG' ler bulunmakla birlikte, kazanları birbirinden ayıran temel özellikler; dik veya yatay olmaları, bir veya birden çok basınç kademesinde buhar üretimi yapmaları ve ilave yanma olup olmamasıdır.

Tezde çalışılan proste bulunan kojenerasyon ünitesi atık ısı kazanı ise tek basınç kademeli olup 1000 psi ( 68 bar ) buhar üretmektedir. Gaz türbininden 550-600 °C arası gelen hava sırasıyla; ikinci kademe kızdırıcı, birinci kademe kızdırıcı, buharlaştırıcı, ekonomizer ve baca yolunu izlerken kazan besleme suyu tam tersi yolu izler.

Ekonomizer bölgesi fin tipli bir eşanjör olup baca gazının sıcaklığından faydalanarak kazan besleme suyunun ısıtıldığı bölümdür. Bu bölümden çıkan su buharlaştırıcıya girer. Buharlaştırıcıda su ve buhar fazı buhar dramında ayrılır ve buhar fazı kızdırıcılara gönderilir. İki kademeli kızdırıcıda ise kızgın buhar üretilir [5], [6].

Atık ısı kazanının açıklamalı çizimi Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2. 4: Atık ısı kazanı genel görünümü.

### 2.3. Degazör

Yüksek basınçlı buhar sistemlerinde, buhar üreticinin sağlıklı ve güvenilir çalışabilmesi için korozyonun önlenmesi oldukça önemlidir. Buhar sistemlerinde

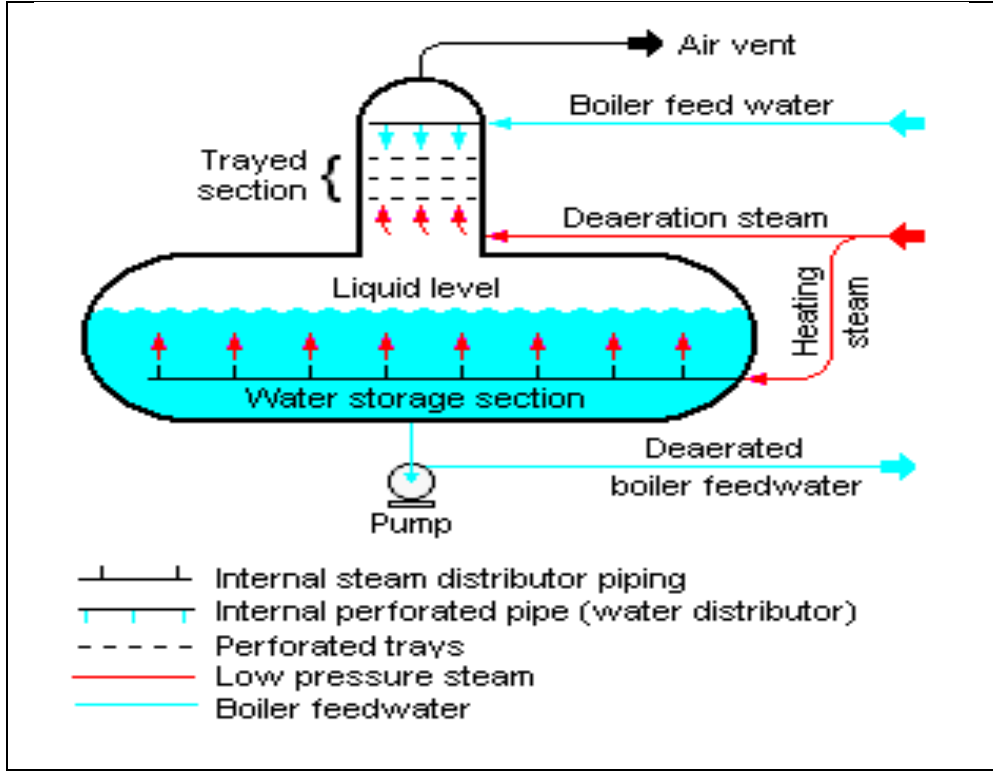
kritik bir parametre olan oksijen korozyonunun önlenmesi adına degazör sistemleri enerji üretim sektöründe yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Konvansiyonel degazör teknolojisinde oksijen sıyırma için buhar kullanılmaktadır. Bir dramın içinde bulunan demineralize su, düşük basınçlı buhar ile ısıtılarak kaynama noktasına getirilir. İçeriye verilen buhar sayesinde oksijen ve kalan diğer çözülmüş gazlar sıyırılır ve atmosfere atılır. Çoğu enerji santralinde bu sıyırma buharı buhar türbinin ara kademelerinden çekilir. Sıyırma buharı kullanmasından dolayı konvansiyonel degazör sistemi son yıllarda gelişen membran degazörlere kıyasla verimsizdir.

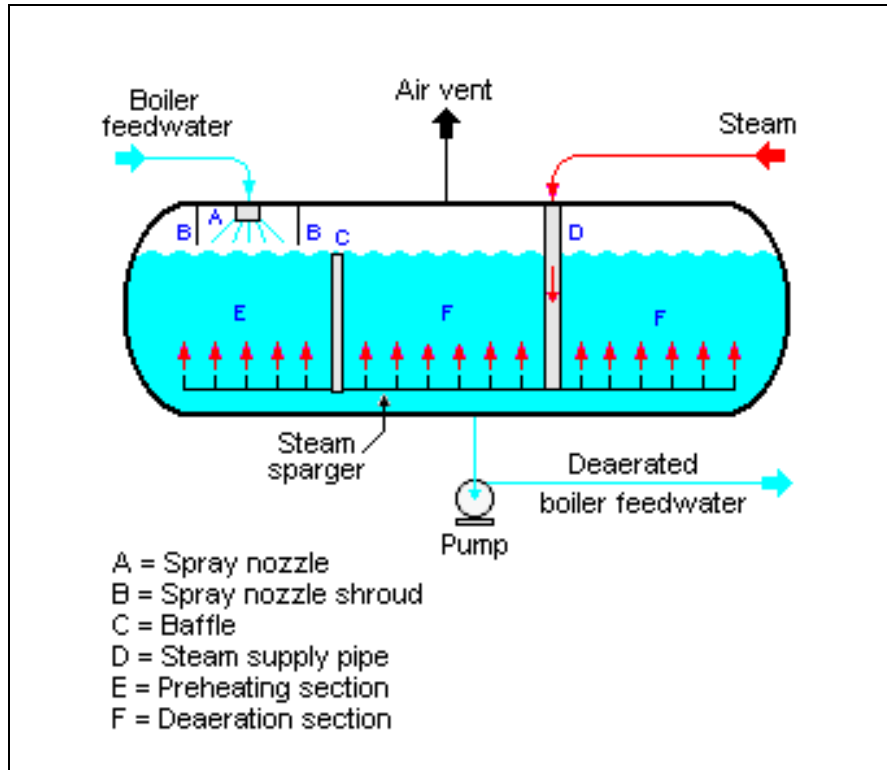
Son yıllarda gelişen membran degazör teknolojileri de piyasada kullanılmaya başlanmıştır. Sıyırma buharı kullanılmaması konvansiyonel degazör göre önemli avantajdır fakat konvansiyonel sistemde bulunan kazan besleme suyuna yataklık yapma özelliği bulunmamaktadır. Ayrıca, kazan besleme suyu sıcaklığının belirli bir derecenin üzerinde olması gerekiyor ise membran degazör geçirilen soğuk suyun tekrar ısıtılması gerekeceğinden membran sisteminin bir avantajı kalmamaktadır.

Membran degazör sisteminin çalışma mantığı, su arıtma prosesinde kullanılan ters ozmoz ile hemen hemen aynıdır. Seçici geçirgen zarlar oksijeni geçirirken suyu geçirmez. Zarın bir tarafında biriken oksijen azotla süpürülerek atılır.

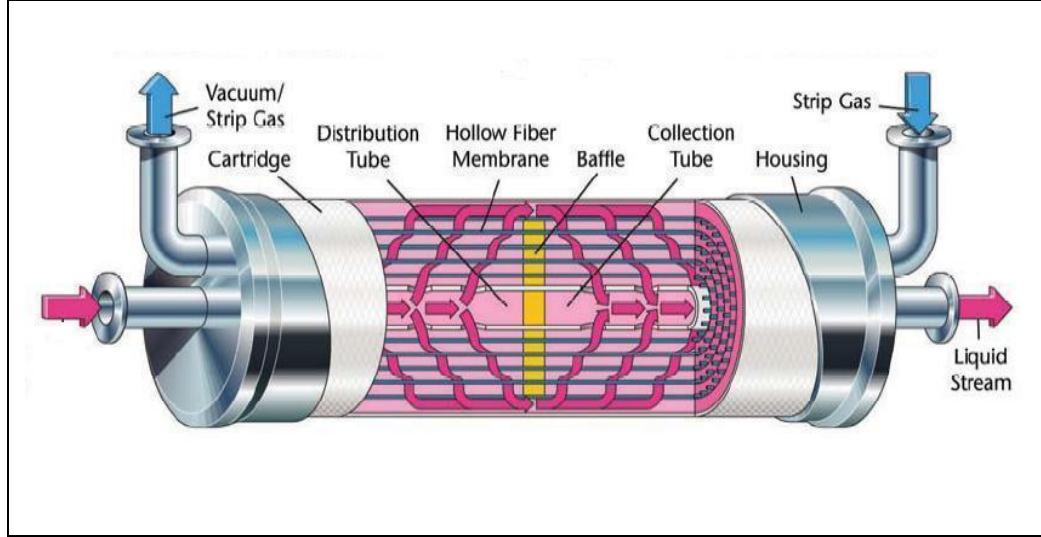
Şekil 2.5’de tepsi tipi konvansiyonel degazör, Şekil 2.6’da sprey tipi konvansiyonel degazör, Şekil 2.7’de ise membran degazör gösterilmektedir [7], [8].



Şekil 2. 5: Tepsi tipi degazör görünümü.



Şekil 2. 6: Spray tipi degazör görünümü.



Şekil 2. 7: Membran degazör görünümü.

## 2.4. Konvansiyonel Kazan

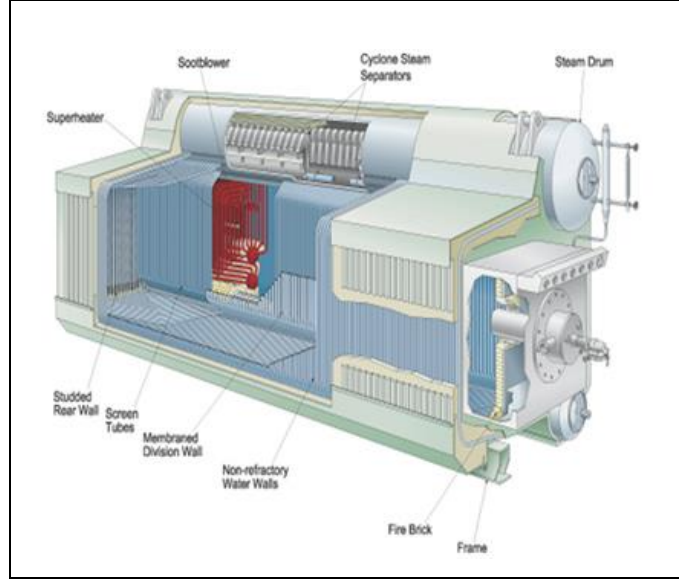
Sanayi devrimi ile beraber buhar; enerji üretimi, ulaşım, ısınma vb. amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Buhar üretim metotları ise yıllardır gelişmiş ve modern teknoloji ile beraber çok daha güvenli ve verimli hale gelmiştir. Günümüzde enerji üretim santrallerinde pek yer bulamasa da rafineri gibi farklı kalite ve basınçta buhar tüketimi olan proseslerde konvansiyonel kazan ile buhar üretimi devam etmektedir. Atık ısı kazanlarının aksine, konvansiyonel kazanlarda sıcak hava kaynağı gaz türbini değil cebri ya da tabii akışlı hava ve yakıt karışımının brülörde yakılması ile elde edilen gazdır. Kazanda üretilen buhar, buhar türbinine verilir ve elektrik enerjisi ile düşük basınçta buhar elde edilir.

Konvansiyonel kazanların çalışma mantığı sıcak gaz kaynağı dışında atık ısı kazanına benzemektedir. Bir fanla itilen veya vakum etkisi ile kazana çekilen hava brülörde yakıt ile birleşerek yanar ve nihayetinde sıcak gaz üretilir. Bu sıcak gaz sırası ile kızdırıcı, buharlaştırıcı, ekonomizer ve baca yolunu izlerken, kazan besleme suyu tam tersi yolu izler.

Belirli bir basınç ve sıcaklıkta ekonomizere sokulan kazan besleme suyu, ekonomizer çıkışında buhar dramına girer. Buradan downcomer tüpleri ile kazanın alt tarafında bulunan çamur dramına girer. Çamur dramından riser tüpleri ile ısınarak tekrar buhar dramına giren su, burada genişlerken buhar oluşturur. Buhar dramının en üstünden ( yani buhar fazından ) çekilen doygun buhar kızdırıcıya verilir. Kızdırıcı

sonrası bazı tasarımlarda desuperheater bulunur. Superheaterda kızdırılan buhar, desuperheaterda soğutulur ve kontrollü bir şekilde kullanıma verilir.

Konvansiyonel kazanların alev borulu ve su borulu türleri vardır. Sanayide daha çok su borulu kullanılmaktadır. Su borulu kazanlar ise dramların ve brülörlerin konumuna göre A tipi, D tipi ve O tipi olmak üzere üçe ayrılır. Kazanın ayrıntılı çizimi Şekil 2.8’de gösterilmektedir [9].



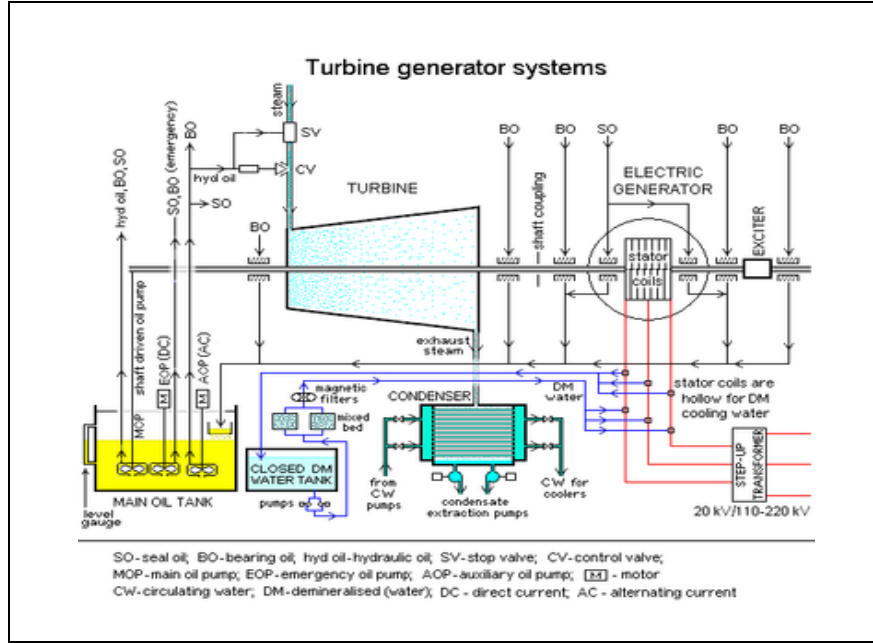
Şekil 2. 8: Konvansiyonel kazanın genel görünümü.

## 2.5. Buhar Türbini

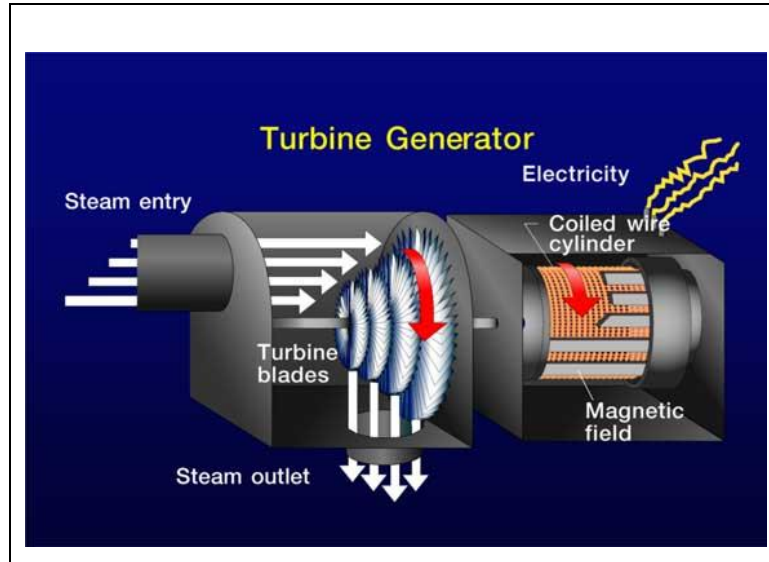
Buhar türbinlerinde; fosil yakıt, nükleer enerji veya yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen buhar kullanılır. Türbine giren buhar genişir ve türbin kanatlarını çevirir. Buhar türbiniyle aynı şaftta bulunan generatorde elektromanyetik etki ile elektrik üretimi gerçekleşir.

Buhar türbinleri; kullanım alanlarına ve çıkış basınç türüne göre farklı sınıflara ayrılırlar. Bazı sistemlerde bir pompa veya kompresör çevirme amacıyla kullanılan buhar türbinleri, enerji santrallerinde çıkışları oldukça düşük olacak şekilde tasarlanır. Böylece elektrik üretimi maksimize edilir. Prosesinde farklı basınç kademelerinde buhar kullanan rafinerilerde bulunan buhar türbinlerinin çıkışları ise ihtiyaca göre tasarlanır. Bazı türbinlerde ise birkaç farklı basınçta çekişler bulunmaktadır [10].

Tezde çalışılan buhar türbinlerinin çekiş basınçları ise ilerleyen kısımlarda belirtilmiştir. Ayrıca, işletme güvenilirliği açısından proste kullanılan pompa ve kompresörlerde türbinli çeviriciler bulunmaktadır. Buhar türbinlerinin ile ilgili çizimler Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'de verilmektedir [11], [12].



Şekil 2. 9: Turbin jeneratör sisteminin genel görünümü.



Şekil 2. 10: Jeneratör genel görünümü.



### 3. SİMULASYON ÇALIŞMASI

Tez kapsamındaki kojenerasyon prosesinin simüle edilmesi amacıyla Aspen HYSYS programı kullanıldı. İlerleyen bölümlerde bulunan ekserji dengesinin ve kayıplarının hesaplanmasında simülasyon çalışması sonuçlarından faydalanıldı.

#### 3.1. Komponent Seçimi

Kojenerasyon prosesinde kullanılan ve işlenen madde sudur. Gaz türbini, atık ısı kazanının supplementary firing modu ve buhar kazanında ise yakıt olarak doğalgaz ile yanma havası kullanılmaktadır.

Hesaplamalar ve simülasyon çalışması yapılırken doğalgaz %100 metan olarak, hava ise % 21 oksijen balans azot olarak kabul edildi.

Tablo 3.1’de proses simülasyon programına girilen komponentler gösterilmektedir.

Tablo 3. 1: Seçilen komponentler.

|          | <b>Seçilen Komponentler</b> | <b>Semboller</b> |
|----------|-----------------------------|------------------|
| <b>1</b> | Metan                       | CH <sub>4</sub>  |
| <b>2</b> | Su                          | H <sub>2</sub> O |
| <b>3</b> | Karbondioksit               | CO <sub>2</sub>  |
| <b>4</b> | Azot                        | N <sub>2</sub>   |
| <b>5</b> | Oksijen                     | O <sub>2</sub>   |

#### 3.2. Akışkan Paketi Seçimi ve Hal Denklemleri

Proses simülasyon programının kullanacağı akışkan özellikleri paket olarak seçilmektedir. Seçilen pakete göre programın veri tabanında bulunan katsayılar kullanılmaktadır. Tablo 3.2’de programa girilen akışkan özellik paketi ve kullanılan yöntemler listelenmektedir.

Tablo 3. 2: Seçilen hal denklemleri paketleri.

| <b>Hal Denklemi Paketleri</b> |                |
|-------------------------------|----------------|
| Seçilen Paket                 | Peng-Robinson  |
| Yoğunluk                      | Costald        |
| Hal Denklemi Çözüm Metodu     | Kubik Analitik |

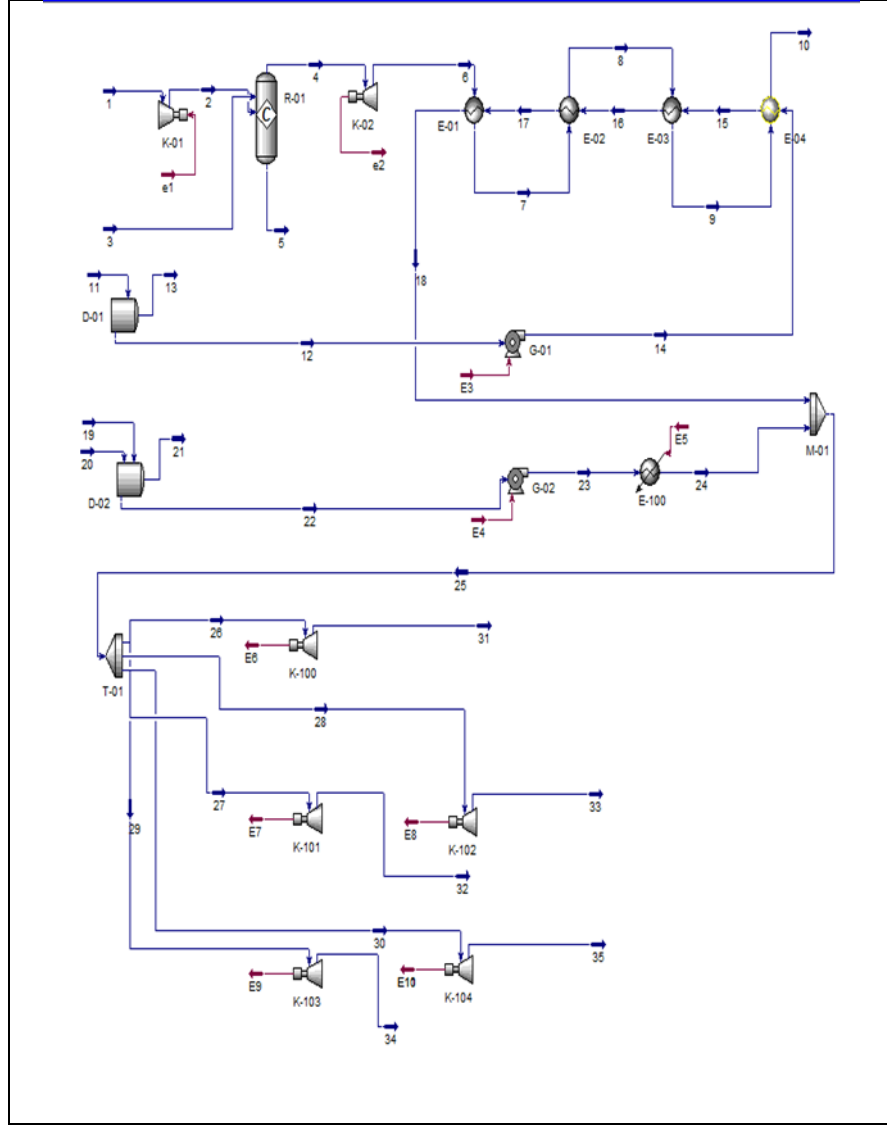
### 3.3. Reaksiyon Tanımı

Gaz türbininde ve buhar kazanında bulunan brülörlerde gerçekleşen yanma reaksiyonu proses simülasyon programına bu bölümde tanıtıldı. Reaksiyonun metanın % 100 dönüşümü ile gerçekleştiği kabul edilmektedir. Programa tanıtılan yanma reaksiyonu Denklem 3.1’de gösterilmektedir.



### 3.4. Proses Simülasyon Çalışması

Kojenerasyon prosesi; gaz türbini, atık ısı kazanı, buhar kazanı, kazan besleme suyu sistemi ve buhar türbinleri olmak üzere 5 ana bölümde simüle edildi. Prosesin simülasyon modeli şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 1: Proses akış şeması.

### 3.4.1. Gaz Türbini Simülasyon Modeli

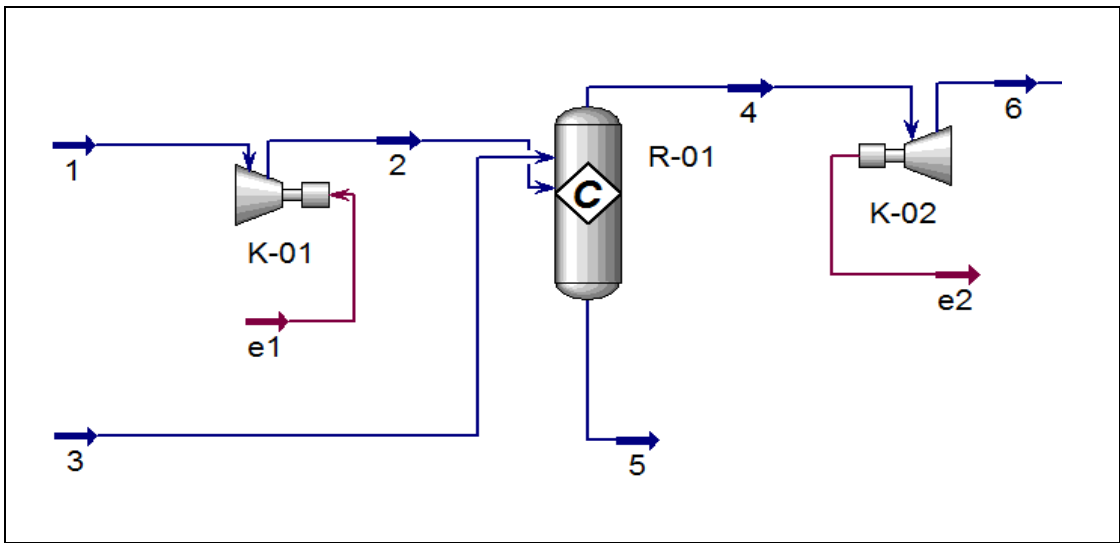
Kojenerasyon prosesinin en önemli bölümü olan gaz türbini, 3 parça halinde simüle edildi.

- Hava kompresörü
- Yanma mahalli
- Türbin

Gaz türbinin ilk ekipmanı olan hava kompresörü, atmosferden emdiği havayı 11 bar değerine basınçlandırmaktadır. Kompresörün çıkışındaki sıcaklık bilindiğinden verimi bu değere göre hesaplandı.

Yanma odası ise simülatörde bulunan “conversion reactor” modeli kullanılarak simüle edildi. Reaktörde; metanın yanma reaksiyonu %100 dönüşüm ile gerçekleşmektedir.

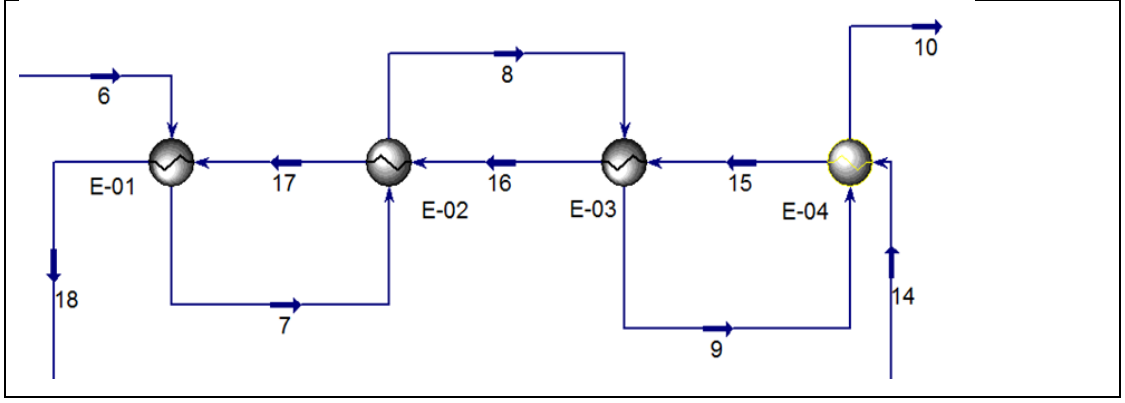
Yanma odasından çıkan yaklaşık 1100 °C'deki sıcak gaz türbine girer ve genişir. Türbin yaklaşık 84 MW elektrik üretirken kompresör bunun 44 MW'ını tüketir. Şekil 3.2'de gaz türbini ünitesi akış şeması verilmektedir.



Şekil 3. 2: Gaz türbini ünitesinin akış şeması.

### 3.4.2. Atık Isı Kazanı Simülasyon Modeli

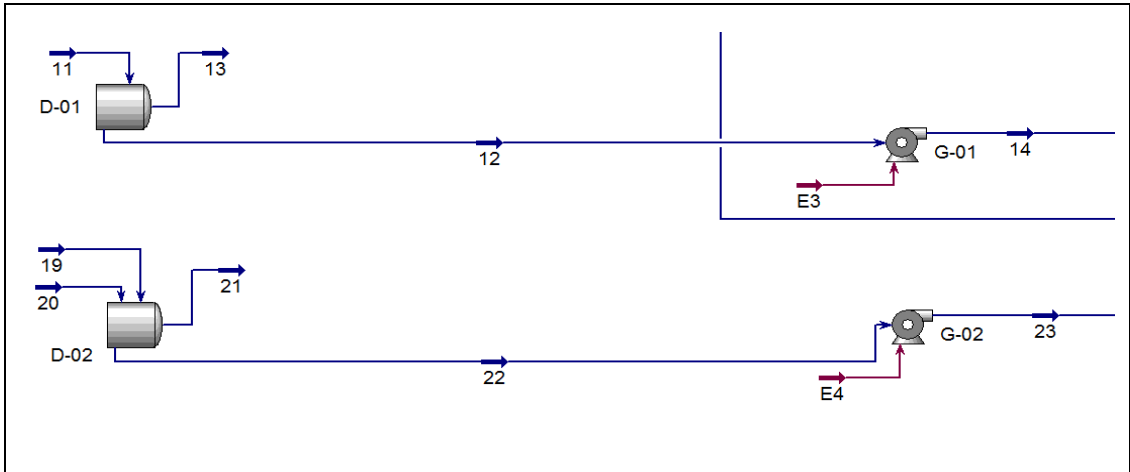
Gaz türbininden gelen yaklaşık 560 °C sıcak gazın enerjisinden atık ısı kazanı bölümünde faydalanılmaktadır. Atık ısı kazanı, temel olarak 4 adet eşanjörden oluşmaktadır. Programda bu eşanjörler simüle edilmiş ve teorik baca gaz sıcaklığı ile gerçek baca gazı sıcaklığı kıyaslandı. Sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmış olup değerler ilerleyen kısımlarda paylaşıldı. Atık ısı kazanı ünitesinin akış şeması Şekil 3.3'de bulunmaktadır.



Şekil 3. 3: Atık ısı kazanı ünitesinin akış şeması.

### 3.4.3. Degazör ve Kazan Besleme Suyu Sistemi Simülasyon Modeli

Atık ısı kazanı ve konvansiyonel kazana hammadde yani su besleyen sistemin simülasyon çalışması bu bölümde yapıldı. Sistemde; 1 adet konvansiyonel degazör, 1 adet membran degazör ve 2 adet yüksek basınç kazan besleme suyu pompası bulunmaktadır. Konvansiyonel degazörde düşük basınç buhar kullanımı var iken membran degazörde herhangi bir enerji kullanımı yoktur. Pompalar ise kazan besleme suyunu 84 bar'a kadar basınçlandırmaktadır. Sistemin akış şeması Şekil 3.4'de verilmektedir.

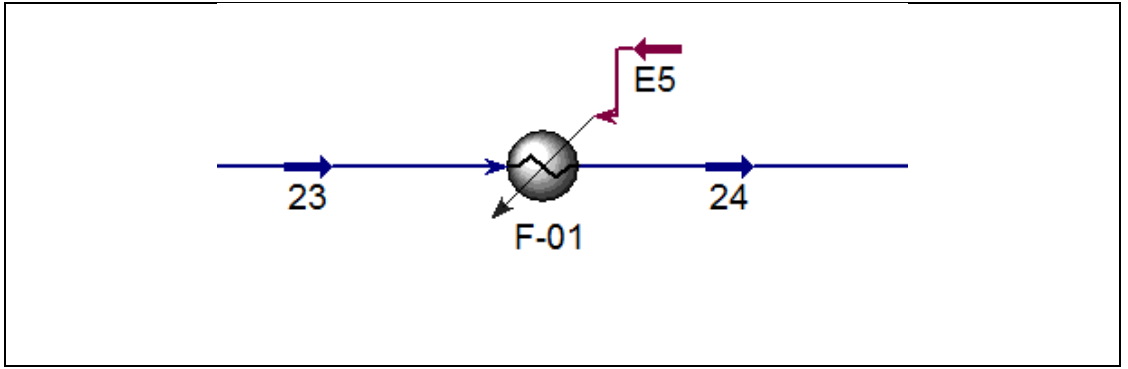


Şekil 3. 4: Degazör ve KBS ünitesinin akış şeması.

### 3.4.4. Konvansiyonel Kazan Simülasyon Modeli

Buhar türbinlerini beslemek amacıyla kullanılan diğer bir sistem ise konvansiyonel kazandır. Bu kazanda yakıt enerjisiyle buhar üretilir. Üretilen buhar, türbine beslenir ve elektrik üretilir. Programda konvansiyonel kazan simüle etmek için herhangi bir model bulunmadığından benzer bir model olan “heater” kullanıldı. Kazana beslenen yakıtın enerjisi ısıtıcıya enerji girişi olarak verilmiş ve buhar üretilmesi sağlandı.

Şekil 3.5’de konvansiyonel kazan akış şeması gösterilmektedir.

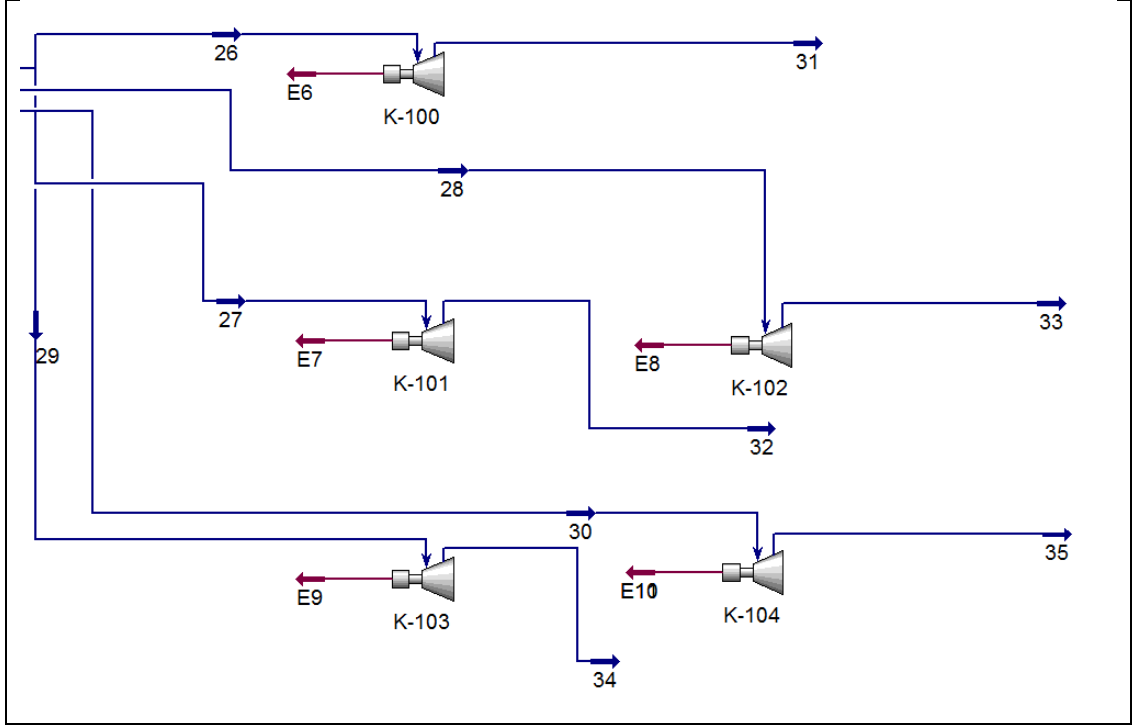


Şekil 3. 5: Konvansiyonel kazan ünitesinin akış şeması.

### 3.4.5. Buhar Türbinleri Simülasyon Modeli

Kojenerasyon tesisinde hem elektrik hem de düşük ve orta kademe basınç buhar üretilmesi amacıyla buhar türbinleri kullanılmaktadır. Proseste bulunan 3 adet buhar türbinin farklı kademe buhar çekişleri ayrı buhar türbini olarak simüle edildi. Buhar çekiş sıcaklıkları bilindiğinden türbinleri verimleri bu değerlere göre hesaplandı.

Şekil 3.6’da ilgili ünitenin akış şeması verildi.



Şekil 3. 6: Buhar türbinleri ünitesinin akış şeması.

### 3.5. Kütle, Enerji ve Ekserji Denklikleri

Tez çalışmasının amacı çalışma için seçilen prosesin simüle edilmesi, simülasyon çalışması sonuçlarının kullanılarak ekserji denkliği kurulmasıdır. Tezin üçüncü bölümünde proses simülasyon programı tarafından yapılan kütle ve enerji denkliği açıklandı. Bu bölümde ise kütle ve enerji denkliği formülleri kullanılarak el ile yapılan denklik sonuçları verildi. Kütle, enerji ve ekserji için kurulan denklikler Ek A'da gösterildi.

#### 3.5.1. Enerji Denklikleri

Tez kapsamında olan proses genel enerji denkliği formülü kullanılarak enerji analizi yapıldı. Bu analizde çıkan sonuçla simülasyon çalışmasında bulunan sonuç kıyaslandı ve yakın bulundu. Analiz sonrasında ünitelerin enerji verimleri hesaplandı. Yapılan hesaplar ilerleyen bölümlerde ekserji analizleriyle kıyaslandı.

### 3.5.2. Ekserji Denklikleri

Enerji denkliği ve analizinin yapılmasının ardından proses simülasyon programından elde edilen entalpi ve entropi değerleri kullanılarak ekserji denkliği ve analizi yapıldı.

Ekserji analizi yapılırken kabul yapılması gereken çevre sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 1 atm ve 25 °C olarak alındı. Ekserji denklikleri için kullanılan formüller Ek A'da verildi.

Tezin önceki bölümlerinde yapılan simülasyon çalışması, hazırlanan kütle, enerji ve ekserji denklikleri kullanılarak proseste bulunan akımların enerji ve ekserji değerleri hesaplandı ve bu değerler kullanılarak verim analizleri yapıldı.



## 4. SİMULASYON ÇALIŞMASI SONUÇLARI

### 4.1. Kütle ve enerji denklileri

Simülatör kullanılarak hazırlanan ünite modeline saha ölçümleri girildi. Modelin güvenilirliği sistemden farklı yüklerde alınan saha ölçümleri ile simülasyon çalışmasının sonuçları kıyaslanarak doğrulandı.

Proses simülasyon programı tüm proses genelinde kütle ve enerji denkliliği hesapladı. Bu sonuçlar Tablo 4.1’de ve Tablo 4.2’de verilmiştir. Ayrıca, kütle ve enerji denklileri teorik olarak tekrar hesaplandı ve sonuçlar kıyaslandı. Sonuçlar arasında fark bulunmadığından ekserji denkliliği bölümünde proses simülasyon programından alınan entalpi ve entropi değerleri kullanıldı.

Tablo 4. 1: Simülasyon çalışması kütle denkliliği sonuçları.

| Girdiler ( kg/h) |                 |        | Çıktılar ( kg/h ) |                    |        |
|------------------|-----------------|--------|-------------------|--------------------|--------|
| 1                | Hava            | 495000 | 5                 | Yanma sonrası sıvı | 0      |
| 3                | Doğalgaz        | 9000   | 10                | Baca gazı          | 504000 |
| 11               | Demineralize Su | 69000  | 13                | Membran Vent       | 0      |
| 19               | LPS             | 10000  | 21                | Degazör Vent       | 0      |
| 20               | Demineralize Su | 90000  | 31                | LPS                | 50000  |
|                  |                 |        | 32                | MPS                | 4000   |
|                  |                 |        | 33                | LPS                | 53000  |
|                  |                 |        | 34                | MPS                | 45000  |
|                  |                 |        | 35                | Kondanse           | 17000  |
| <b>Toplam</b>    |                 | 673000 |                   |                    | 673000 |

Tablo 4. 2: Simülasyon çalışması enerji denklığı sonuçları.

| <b>Girdiler ( kW)</b> |                  |         | <b>Çıktılar ( kW)</b> |                 |         |
|-----------------------|------------------|---------|-----------------------|-----------------|---------|
| <b>1</b>              | Hava             | -734    | <b>10</b>             | Baca gazı       | -112100 |
| <b>3</b>              | Doğalgaz         | -11680  | <b>31</b>             | LPS             | -182800 |
| <b>11</b>             | Demineralize Su  | -301900 | <b>32</b>             | MPS             | -14520  |
| <b>19</b>             | LPS              | -36560  | <b>33</b>             | LPS             | -194300 |
| <b>20</b>             | Demineralize Su  | -395000 | <b>34</b>             | MPS             | -160900 |
| <b>E1</b>             | Kompresör Enerji | 44630   | <b>35</b>             | Kondanse        | -62980  |
| <b>E5</b>             | Kazan Enerji     | 77020   | <b>E2</b>             | Gaz Türbini     | 87100   |
|                       |                  |         | <b>E6</b>             | Turboalternatör | 5691    |
|                       |                  |         | <b>E7</b>             | Turboalternatör | 344     |
|                       |                  |         | <b>E8</b>             | Turboalternatör | 6557    |
|                       |                  |         | <b>E9</b>             | Turboalternatör | 1458    |
|                       |                  |         | <b>E10</b>            | Turboalternatör | 2755    |
| <b>Toplam</b>         |                  | -624224 |                       |                 | -624224 |

## 4.2. Özet Akım Tablosu

Tezde çalışılan proses simülasyon modeli kuruldu, sahadan alınan ölçümler kullanılarak model çözüldü.

Simülasyon çalışması kapsamında olan akımların basınç, sıcaklık, kütlelesel akış, entalpi, entropi, fiziksel ve kimyasal ekserji terimleri özet akım tablosu olarak Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verildi.

Tablo 4. 3: Akım değerleri.

|                       |                    | 1       | 2       | 3       | 4        | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       |
|-----------------------|--------------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Basınç                | bar                | 0.02    | 11.00   | 22.01   | 10.80    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    |
| Sıcaklık              | $^{\circ}\text{C}$ | 25.00   | 330.00  | 38.00   | 1,066.82 | 559.34  | 541.80  | 518.40  | 301.19  | 181.50  |
| Kütlesel Akış         | kg/h               | 495,000 | 495,000 | 9,000   | 504,000  | 504,000 | 504,000 | 504,000 | 504,000 | 504,000 |
| Entalpi               | kJ/kg              | 298.60  | 611.00  | 8.13    | 1,393    | 736.30  | 715.17  | 688.32  | 442.50  | 312.27  |
| Entropi               | kJ/kgK             | 6.87    | 6.88    | (1.56)  | 7.38     | 7.48    | 7.46    | 7.42    | 7.06    | 6.81    |
| Fiziksel Ekserji Hızı | kW                 | -       | 42,381  | 1,186   | 131,527  | 35,205  | 33,291  | 30,949  | 11,638  | 4,043   |
| Kimyasal Ekserji Hızı | kW                 | -       | -       | 128,461 | 819.44   | 819.44  | 819.44  | 819.44  | 819.44  | 819.44  |
| Toplam Ekserji Hızı   | kW                 | -       | 42,381  | 129,647 | 132,347  | 36,024  | 34,110  | 31,769  | 12,458  | 4,863   |

Tablo 4. 4: Akım değerleri.

|                       |                | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     |
|-----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Basınç                | bar            | 7.00   | 7.00   | 84.00  | 69.21  | 69.21  | 68.71  | 68.21  | 3.50   | 7.00   |
| Sıcaklık              | <sup>0</sup> C | 56.33  | 56.33  | 56.33  | 249.93 | 286.28 | 360.00 | 420.00 | 170.00 | 45.00  |
| Kütlesel Akış         | kg/h           | 69,000 | 69,000 | 69,000 | 69,000 | 69,000 | 69,000 | 69,000 | 10,000 | 90,000 |
| Entalpi               | kJ/kg          | 235.00 | 235.00 | 241.61 | 1,085  | 2,777  | 3,046  | 3,211  | 2,800  | 189.12 |
| Entropi               | kJ/kgK         | 0.78   | 0.78   | 0.78   | 2.79   | 5.82   | 6.28   | 6.53   | 7.10   | 0.64   |
| Fiziksel Ekserji Hızı | kW             | 134.11 | 134.11 | 283.72 | 4,980  | 20,053 | 22,626 | 24,363 | 1,914  | 85.83  |
| Kimyasal Ekserji Hızı | kW             | 47.88  | 47.88  | 47.88  | 47.88  | 47.88  | 47.88  | 47.88  | 6.94   | 62.45  |
| Toplam Ekserji Hızı   | kW             | 181.99 | 181.99 | 331.60 | 5,028  | 20,101 | 22,674 | 24,410 | 1,921  | 148.27 |

Tablo 4. 5: Akım değerleri.

|                       |                | 19      | 20      | 21     | 22      | 23      | 24      | 25      | 26     | 27     |
|-----------------------|----------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Basınç                | bar            | 0.10    | 84.00   | -      | -       | 0.02    | 68.21   | 68.21   | 68.21  | 3.50   |
| Sıcaklık              | <sup>0</sup> C | 105.00  | 105.00  | 25.00  | 160.00  | 25.00   | 420.00  | 420.00  | 420.00 | 170.00 |
| Kütlesel Akış         | kg/h           | 100,000 | 100,000 | 6,400  | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 169,000 | 50,000 | 50,000 |
| Entalpi               | kJ/kg          | 440.23  | 446.42  | -1     | 312.27  | 298.60  | 3,211   | 3,211   | 3,211  | 2,800  |
| Entropi               | kJ/kgK         | 1.36    | 1.35    | -      | 6.81    | 6.87    | 6.53    | 6.53    | 6.53   | 7.10   |
| Fiziksel Ekserji Hızı | kW             | 1,069   | 1,348   | -      | 802.36  | -       | 35,308  | 59,671  | 17,654 | 9,570  |
| Kimyasal Ekserji Hızı | kW             | 69.39   | 69.39   | 91,349 | 1,411   | -       | 69.39   | 117.26  | 34.69  | 34.69  |
| Toplam Ekserji Hızı   | kW             | 1,138   | 1,418   | 91,349 | 2,213   | -       | 35,378  | 59,789  | 17,689 | 9,605  |

Tablo 4. 6: Akım değerleri.

|                       |                | 28     | 29     | 30     | 31     | 32     | 33     | 34     | 35     |
|-----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Basınç                | bar            | 68.21  | 11.00  | 68.21  | 3.50   | 68.21  | 11.00  | 68.21  | -      |
| Sıcaklık              | <sup>0</sup> C | 420.00 | 232.00 | 420.00 | 170.00 | 420.00 | 232.00 | 420.00 | 70.00  |
| Kütlesel Akış         | kg/h           | 4,000  | 4,000  | 53,000 | 53,000 | 45,000 | 45,000 | 17,000 | 17,000 |
| Entalpi               | kJ/kg          | 3,211  | 2,894  | 3,211  | 2,800  | 3,211  | 2,894  | 3,211  | 293.05 |
| Entropi               | kJ/kgK         | 6.53   | 6.75   | 6.53   | 7.10   | 6.53   | 6.75   | 6.53   | 0.95   |
| Fiziksel Ekserji Hızı | kW             | 1,412  | 985.71 | 18,713 | 10,144 | 15,888 | 11,089 | 6,002  | 62.30  |
| Kimyasal Ekserji Hızı | kW             | 2.78   | 2.78   | 36.77  | 36.77  | 31.22  | 31.22  | 11.80  | 11.80  |
| Toplam Ekserji Hızı   | kW             | 1,415  | 988    | 18,750 | 10,181 | 15,920 | 11,120 | 6,014  | 74.09  |

### 4.3. Özet Ekipman Tablosu

Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’da paylaşılan özet akım tablolarında bulunan sonuçlar ve tezin 3.5. bölümünde anlatılan ekserji denkliği formülleri kullanılarak proste bulunan ekipmanların ekserji dengeleri yapıldı ve ekserji verimleri hesaplandı. Bahsedilen sonuçlar Tablo 4.7’de verilmektedir.

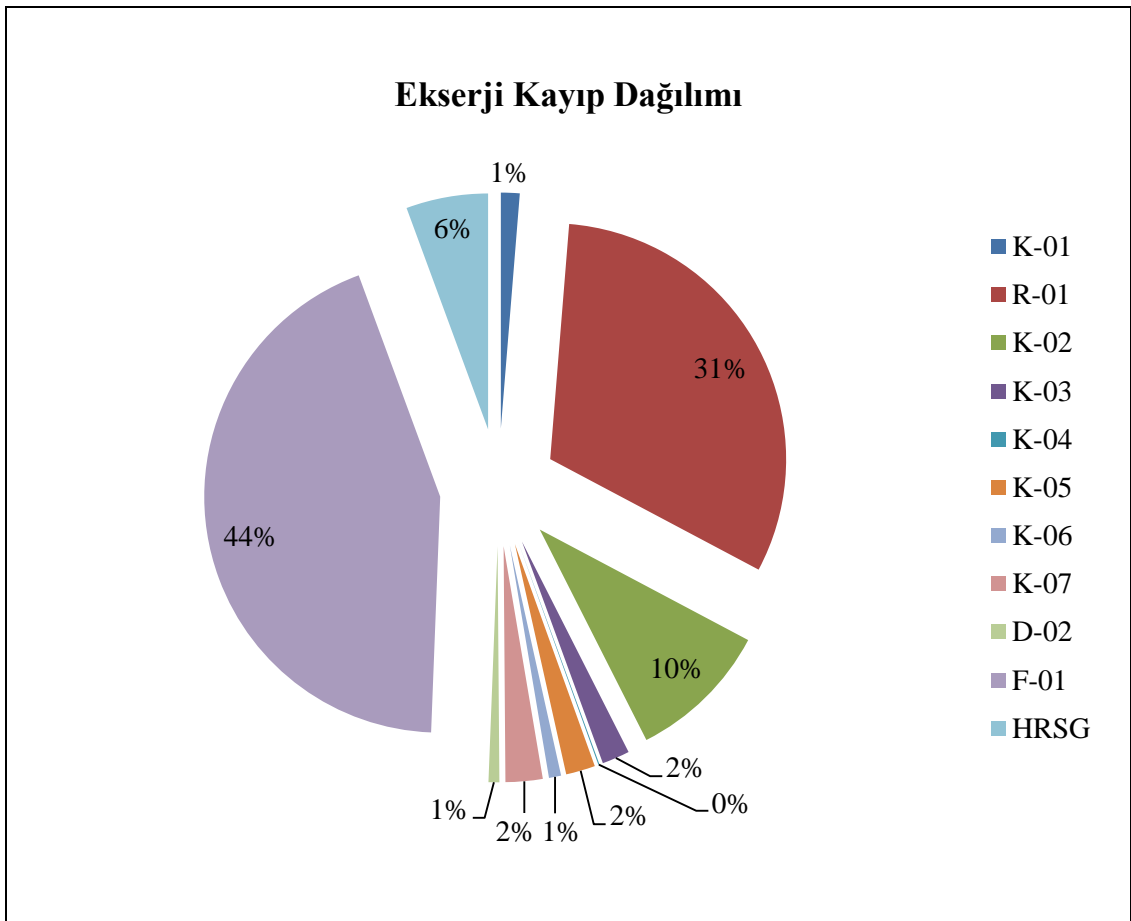
Tablo 4. 7: Ekipman ekserji hızı sonuçları.

|                              | <b>Ekserji Giriş Hızı<br/>(kW)</b> | <b>Ekserji Çıkış Hızı<br/>(kW)</b> | <b>Kayıp<br/>(kW)</b> | <b>Verim<br/>(%)</b> |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Hava<br/>Kompresörü</b>   | 44,000                             | 42,381                             | 1,618                 | 96.3%                |
| <b>Yanma Odası</b>           | 172,028                            | 132,347                            | 39,681                | 79.9%                |
| <b>Gaz Türbini</b>           | 132,347                            | 120,024                            | 12,322                | 90.7%                |
| <b>HRSG</b>                  | 36,356                             | 29,274                             | 7,082                 | 80.5%                |
| <b>Turboalternatör<br/>1</b> | 17,689                             | 15,303                             | 2,385                 | 86.5%                |
| <b>Turboalternatör<br/>2</b> | 1,415                              | 1,321                              | 93                    | 93.4%                |
| <b>Turboalternatör<br/>3</b> | 18,750                             | 16,221                             | 2,529                 | 86.5%                |
| <b>Turboalternatör<br/>4</b> | 15,920                             | 14,870                             | 1,049                 | 93.4%                |
| <b>Turboalternatör<br/>5</b> | 6,014                              | 2,817                              | 3,197                 | 46.8%                |
| <b>Degazör</b>               | 2,069                              | 1,138                              | 930                   | 55.0%                |
| <b>Kazan</b>                 | 92,768                             | 37,591                             | 55,176                | 40.5%                |
| <b>Basit Çevrim</b>          | 129,647                            | 40,000                             | 89,647                | 30.8%                |
| <b>Kombine<br/>Çevrim</b>    | 129,979                            | 69,274                             | 60,704                | 53.3%                |

Yukarıdaki tabloda detaylı bir şekilde verilen ekserji kayıpları ve verimleri incelendiğinde; kombine çevrim verimi % 53.3 olarak hesaplandığı görülmektedir. Hesaplamalarla ilgili daha rahat yorum yapılabilmesi amacıyla sistemdeki toplam ekserji kaybı ve kırılımları Şekil 4.1 ve Tablo 4.8’de gösterilmektedir. Literatür çalışmalarında görülen “ Grassman Diagram “ gösterim biçimi ile tez çalışmasında yapılan ekserji analizi Şekil 4.2 ‘de gösterilmektedir.

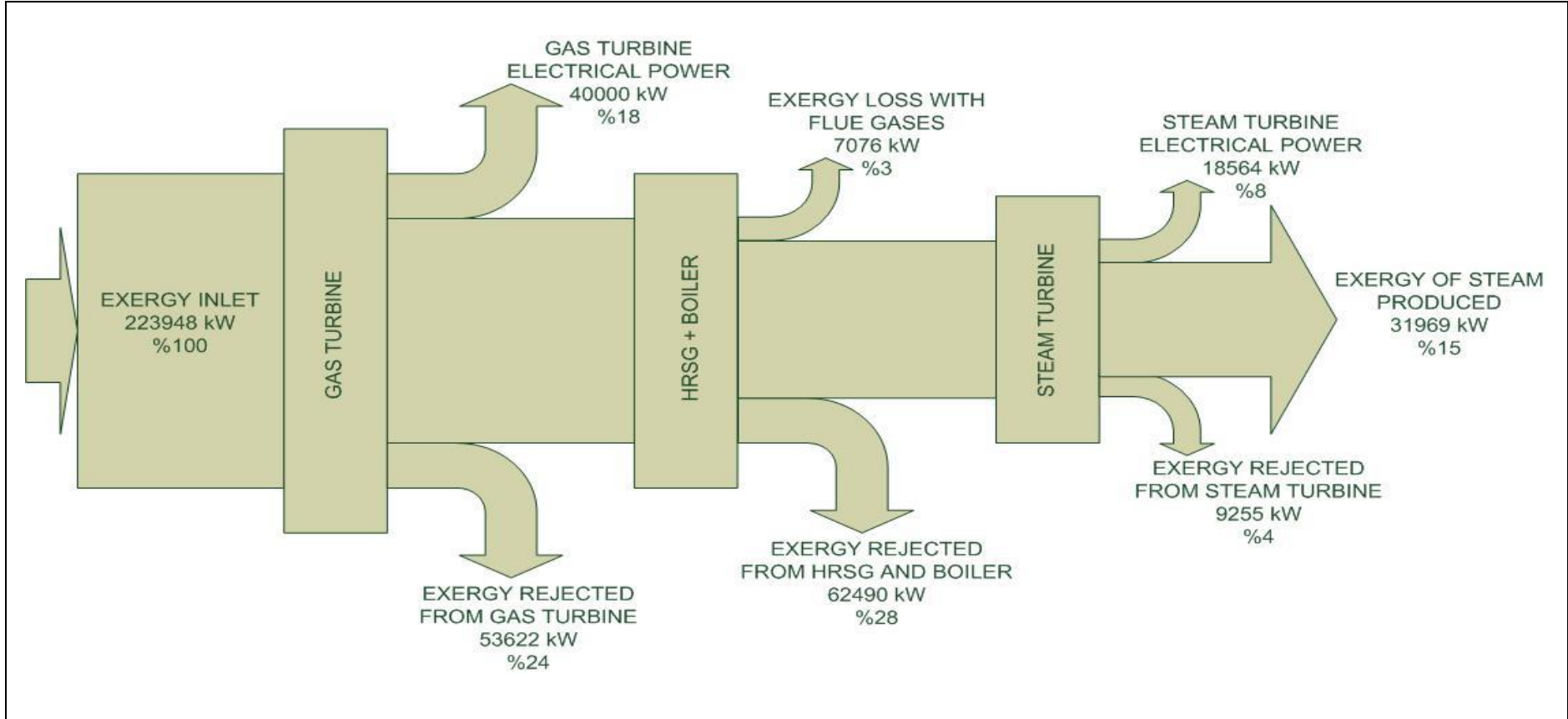
Tablo 4. 8: Ekserji kayıp sıralaması.

|                             | Ekserji Kayıp Hızı (kW) | Ekserji Kayıp Hızı yüzde dağılımı (%) |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| <b>F-01 Kazan</b>           | 55,176.55               | 43.77%                                |
| <b>R-01 Yanma Odası</b>     | 39,681.72               | 31.48%                                |
| <b>K-02 Gaz Türbini</b>     | 12,322.38               | 9.77%                                 |
| <b>HRSG</b>                 | 7,082.09                | 5.62%                                 |
| <b>K-07 Turboalternator</b> | 3,197.21                | 2.54%                                 |
| <b>K-05 Turboalternator</b> | 2,529.00                | 2.01%                                 |
| <b>K-03 Turboalternator</b> | 2,385.96                | 1.89%                                 |
| <b>K-01 Hava Kompresörü</b> | 1,618.65                | 1.28%                                 |
| <b>K-06 Turboalternator</b> | 1,049.79                | 0.83%                                 |
| <b>D-02 Degazör</b>         | 930.67                  | 0.74%                                 |
| <b>K-04 Turboalternator</b> | 93.65                   | 0.07%                                 |
| <b>Toplam</b>               | 126,067.67              | -                                     |



Şekil 4. 1: Ekserji kayıp dağılımı.





Şekil 4. 2: Grassmann diyagramı.

Tezin önceki aşamalarında hesaplanan ekserji ve enerji verimleri Tablo 4.9’da kıyaslandı.

Tablo 4. 9 Enerji ve ekserji verimi kıyaslaması.

|                             | <b>Ekserji Verimi</b> | <b>Enerji Verimi</b> |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>F-01 Kazan</b>           | 40%                   | 98%                  |
| <b>R-01 Yanma Odası</b>     | 77%                   | 97%                  |
| <b>K-02 Gaz Türbini</b>     | 90%                   | 95%                  |
| <b>HRSG</b>                 | 80%                   | 97%                  |
| <b>K-07 Turboalternator</b> | 46%                   | 25%                  |
| <b>K-05 Turboalternator</b> | 86%                   | 98%                  |
| <b>K-03 Turboalternator</b> | 86%                   | 98%                  |
| <b>K-01 Hava Kompresörü</b> | 96%                   | 98%                  |
| <b>K-06 Turboalternator</b> | 93%                   | 98%                  |
| <b>D-02 Degazör</b>         | 55%                   | 95%                  |
| <b>K-04 Turboalternator</b> | 93%                   | 98%                  |

Tablo 4.9’da görülen sonuçlara göre, tüm ekipmanlarda ekserji veriminin enerji veriminden yüksek çıktığı görüldü. En büyük fark ise kazan, yanma odası ve HRSG’de görüldü. Bu sonuçtaki en büyük etken bu ekipmanlarda tersinmez olayların gerçekleşmesidir. Enerji dengesinde entropinin bir etkisi yok iken ekserji dengesinde entropi değişiminin de etkisi görülmektedir.

#### **4.4. Destek Yanmalı Atık Isı Kazanına Geçiş ve Ekserji Kıyaslaması**

Tüpraş İzmit Rafinerisi RUP projesi kapsamında beraber mevcut rafineride bulunan kuvvet santralinde de bir takım revizyonlara gidilmiştir. Bu kapsamda, kuvvet santralinde bulunan ve bir önceki bölümde de ekserji hesaplamalarında en büyük ekserji kaybına neden olan konvansiyonel kazan yerine atık ısı kazanını revize edip destek yanmalı atık ısı kazanına geçiş yapılmasına karar verilmiştir.

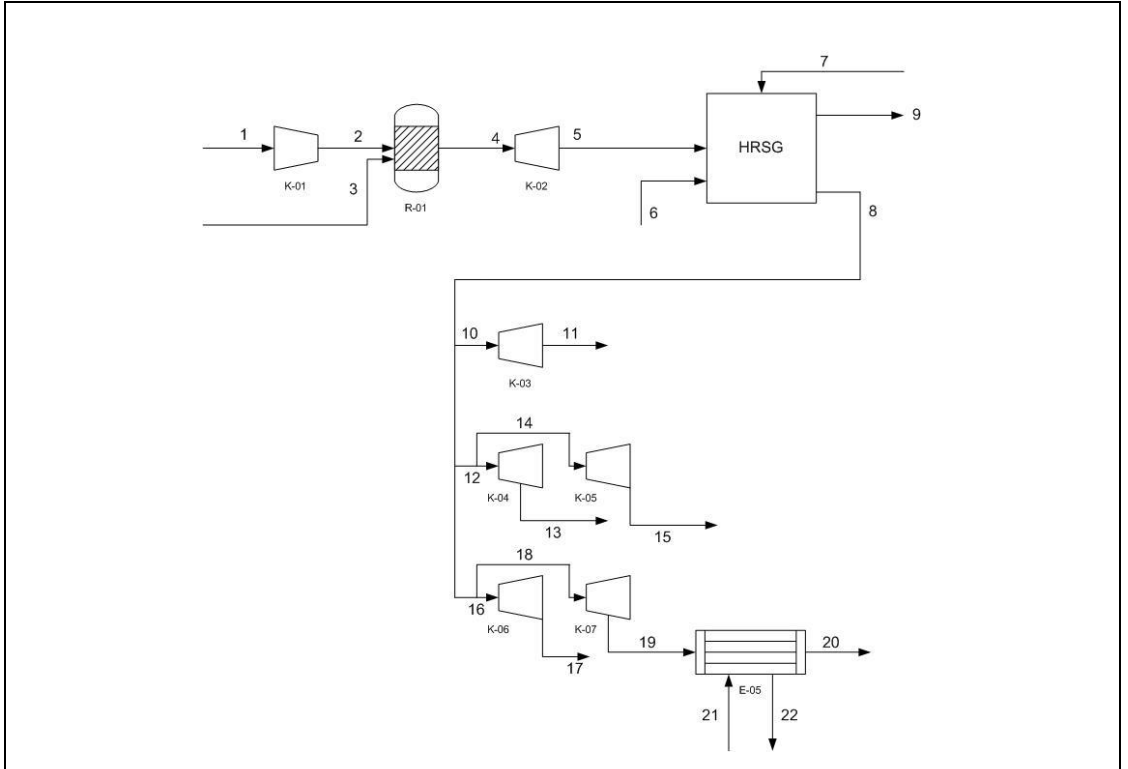
Tezin bu bölümünde mevcut durum ile (atık ısı kazanı + konvansiyonel kazan) varılması hedeflenen durum (destek yanmalı atık ısı kazanı) kıyaslandı.

Kıyaslama çalışmalarında, ekserji analizinde ihmal edilebilecek bir miktar olan degazör ve kazan besleme suyu sistemi hesaba katılmadı. Toplam üretilen elektrik, buhar miktarı ve buhar türbini sistemleri aynı şekilde alındı.

#### 4.4.1. Destek Yanmalı Atık Isı Kazanı

Normal atık ısı kazanlarında gaz türbinin kuyruk gazının ısısından faydalanarak buhar üretilir. Destek yanmalı atık ısı kazanlarında ise gaz türbininden gelen sıcak gaz ve doğalgaz ızgara tipi brülörlerde yakılır ve ekstra ısı elde edilir. Bu yanma işlemi için gaz türbininden gelen sıcak gazda bulunan yüksek oksijen kullanılır. Bu sayede ekstra buhar üretilirken bacadan atmosfere atılan oksijen miktarı da azaltılır. Böylelikle verim artışı sağlanmış olur. Ayrıca, konvansiyonel kazanlarda yanma mahalline hava basmak için elektrik motoru veya türbin çevirici kullanılırken destek yanmalı atık ısı kazanlarında gaz türbininden hava kullanıldığından dolayı elektrik sarfıyatı da bulunmamaktadır.

Yukarıda anlatılan destek yanmalı atık ısı kazanlı sistemin basit akım şeması Şekil 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4. 3: Destek yanmalı atık ısı kazanı akış diyagramı.

Şekil 4.3’de gösterilen sistem programda simüle edildi. Simülasyon çalışmasının yapıldığı tarihte destek yanmalı kazan devrede olmadığından dolayı üretici firmanın vermiş olduğu değerler baz alındı.

Yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen değerler, özet akım tablosu olarak Tablo 4.10, 4.11 ve Tablo 4.12’de verilmektedir.

Normal atık ısı kazanından destek yanmalı atık ısı kazanına geçilmesiyle beraber konvansiyonel kazan durdurulmuştur. Önceki ekserji analizinde en büyük kayıp kalemi olan konvansiyonel kazan yerine destek yanmalı atık ısı kazanına geçilmesiyle beraber sağlanan ekserji verim artışı aşağıda verilmektedir.

Destek yanmalı atık ısı kazanına geçilmesiyle gaz türbini ve turboalternatör sistemlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadı. Bu sistemler için önceki ekserji analizinde bulunan değerler kullanıldı.

Tablo 4. 10: Normal ve destek yanmalı atık ısı kazanı kıyaslaması.

|                             | Normal HRSG                     | Destek Yanmalı HRSG             |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                             | Ekserji Kayıp Hızı Miktarı (kW) | Ekserji Kayıp Hızı Miktarı (kW) |
| <b>F-01 Kazan</b>           | 55,176.55                       | -                               |
| <b>R-01 Yanma Odası</b>     | 39,681.72                       | 39,681.72                       |
| <b>K-02 Gaz Türbini</b>     | 12,322.38                       | 12,322.38                       |
| <b>HRSG</b>                 | 7,082.09                        | 41,328.00                       |
| <b>K-07 Turboalternator</b> | 3,197.21                        | 3,197.21                        |
| <b>K-05 Turboalternator</b> | 2,529.00                        | 2,529.00                        |
| <b>K-03 Turboalternator</b> | 2,385.96                        | 2,385.96                        |
| <b>K-01 Hava Kompresörü</b> | 1,618.65                        | 1,618.65                        |
| <b>K-06 Turboalternator</b> | 1,049.79                        | 1,049.79                        |
| <b>K-04 Turboalternator</b> | 93.65                           | 93.65                           |
| <b>Toplam</b>               | 125,137.00                      | 104,206.35                      |

Tablo 4.10’deki sonuçlarına bakıldığında, yapılan değişiklik sonrasında toplamda 21 MW ekserji kaybı düşüşü olduğu görülmüştür. Bu düşüşte;

- Konvansiyonel kazanda yanma havası olarak kullanılan atmosferik havanın sıcaklığının destek yanmalı kazanda yanma havası olarak kullanılan gaz türbini atık gazı sıcaklığının yanında çok düşük olması en büyük etkidir. Konvansiyonel kazanda yakıtın bir kısmı soğuk havayı ısıtmak için kullanılırken destek yanmalı atık ısı kazanında böyle bir durum yoktur.

- Normal HRSG’de bacadan atılan oksijen miktarı %15 iken destek yanmalı atık ısı kazanında %10'lara düşmektedir. Bacadan atılan oksijen miktarı kazan verimini doğrudan etkilediğinden toplamda oksijendeki düşüş ekserji ve enerji veriminde artışa neden olmuştur.

Tablo 4. 11: Destek yanmalı atık ısı kazanı akım değerleri.

|                  |                | 1       | 2         | 3          | 4          | 5         | 6         | 7       | 8         | 9        |
|------------------|----------------|---------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|---------|-----------|----------|
| Basınç           | bar(g)         | 0.02    | 11.00     | 22.01      | 10.80      | 0.02      | 0.50      | 84.00   | 68.21     | 0.02     |
| Sıcaklık         | <sup>0</sup> C | 25      | 330       | 38         | 1066.8     | 559.3     | 38        | 56.3    | 420       | 93       |
| Kütleli Akış     | kg/h           | 495,000 | 495,000   | 9,000      | 504,000    | 504,000   | 4,800     | 169,000 | 169,000   | 508,800  |
| Entalpi          | kJ/kg          | 298.60  | 611.00    | 8.13       | 1,393.92   | 736.30    | 8.13      | 241.61  | 3,211.73  | 249.00   |
| Entropi          | kJ/kgK         | 6.87    | 6.88      | (1.56)     | 7.38       | 7.48      | (1.56)    | 0.78    | 6.53      | 6.80     |
| Fiziksel Ekserji | kW             | -       | 42,381.35 | 1,186.51   | 131,527.76 | 35,205.38 | 632.00    | 694.91  | 59,671.98 | 4,043.90 |
| Kimyasal Ekserji | kW             | -       | -         | 128,461.06 | 819.44     | 819.44    | 68,512.00 | 117.26  | 117.26    | 819.44   |
| Toplam Ekserji   | kW             | -       | 42,381.35 | 129,647.57 | 132,347.20 | 36,024.82 | 69,144.00 | 812.17  | 59,789.24 | 4,863.34 |

Tablo 4. 12: Destek yanmalı atık ısı kazanı akım değerleri.

|                  |                | 10        | 11       | 12       | 13       | 14        | 15        | 16        | 17        | 18       | 19     |
|------------------|----------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|
| Basınç           | bar(g)         | 68.21     | 3.50     | 68.21    | 11.00    | 68.21     | 3.50      | 68.21     | 11.00     | 68.21    | -      |
| Sıcaklık         | <sup>0</sup> C | 420       | 170      | 420      | 232      | 420       | 170       | 420       | 232       | 420      | 70     |
| Kütlesel Akış    | kg/h           | 50,000    | 50,000   | 4,000    | 4,000.00 | 53,000    | 53,000    | 45,000    | 45,000    | 17,000   | 17,000 |
| Entalpi          | kJ/kg          | 3,211.73  | 2,800.44 | 3,211.73 | 2,894.20 | 3,211.73  | 2,800.44  | 3,211.73  | 2,894.20  | 3,211.73 | 293.05 |
| Entropi          | kJ/kgK         | 6.53      | 7.10     | 6.53     | 6.75     | 6.53      | 7.10      | 6.53      | 6.75      | 6.53     | 0.95   |
| Fiziksel Ekserji | kW             | 17,654.43 | 9,570.47 | 1,412.35 | 985.71   | 18,713.70 | 10,144.70 | 15,888.99 | 11,089.20 | 6,002.51 | 62.30  |
| Kimyasal Ekserji | kW             | 34.69     | 34.69    | 2.78     | 2.78     | 36.77     | 36.77     | 31.22     | 31.22     | 11.80    | 11.80  |
| Toplam Ekserji   | kW             | 17,689.12 | 9,605.16 | 1,415.13 | 988.48   | 18,750.47 | 10,181.47 | 15,920.21 | 11,120.42 | 6,014.30 | 74.09  |

## 5. OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI SONUÇLARI

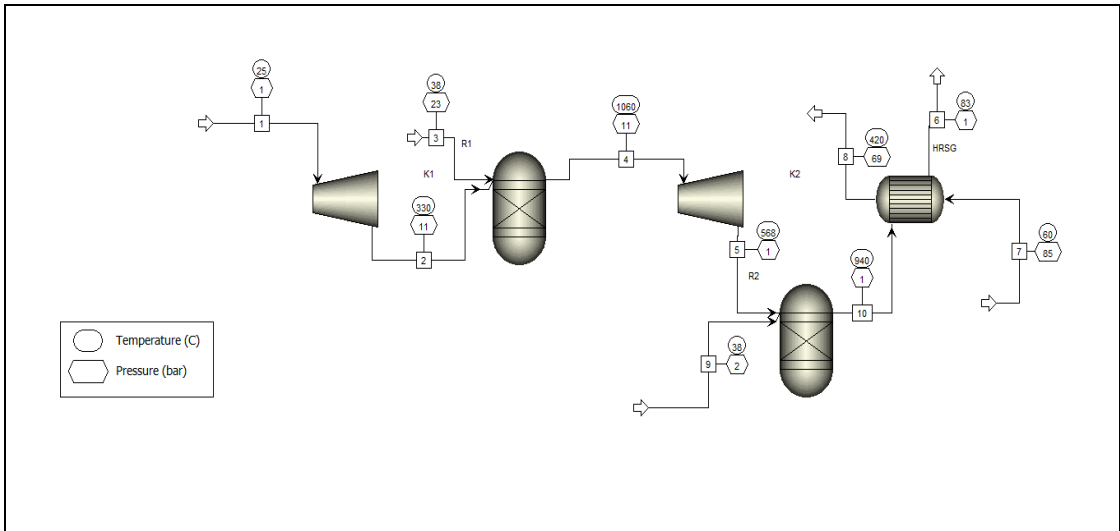
Tez çalışması kapsamında simüle edilen sistemin Aspen Plus simülasyon programı kullanılarak optimizasyonu yapıldı.

Optimizasyon kapsamında hava kompresörü, yanma odası, gaz türbini ve destek yanmalı atık ısı kazanının simülasyon modeli üzerinden parametrik optimizasyon yapıldı. Buhar türbinleri çekişlerinin rafineri ihtiyacını karşılayacak şekilde ayarlanması ve bu ayarın optimizasyona açık olmaması nedeniyle buhar türbinleri optimizasyon kapsamına alınmadı.

Optimizasyon yapılırken programa sistemin genel ekserji dengesini hesaplayacak formül girilmiş, optimizasyon yapılırken hangi parametrelerin değiştirileceğine karar verildi, bu değişkenlerin hangi limitlerde değiştirilebileceği belirtildi ve sistemdeki hangi parametrelerin limitleneceği programa tanıtıldı.

### 5.1. Optimize Edilen Sistemin Simülasyonu

Tezin önceki aşamalarında kuvvet santralindeki tüm ekipmanlar simüle edilmişken optimizasyon amacıyla simüle edilen sistem sadece kojenerasyon prosesini kapsamaktadır. Bu proste gaz türbini kompleksi ve destek yanmalı atık ısı kazanı bulunmaktadır. Aspen Plus programında simüle edilen sistemin görüntüsü Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5. 1: Optimize edilen sistemin akış diyagramı.



Simülasyon çalışması yapılırken ekserji analizi yapılan sistemde kullanılan parametreler aynı şekilde girildi ve sonrasında programın hangi parametreleri kullanarak optimizasyon yapacağı belirlendi.

## 5.2. Optimizasyonda Kullanılan Parametreler ve Özellikler

Optimizasyon için programda bulunan optimizasyon paketi kullanıldı. Bu pakete ilk olarak optimizasyonun amaç fonksiyonunda kullanılacak parametreler tanıtıldı. Tablo 5.1’de bu parametreler gösterildi.

Tablo 5. 1: Optimizasyonda kullanılan proses parametreleri.

| Parametre | İsim    | Tanım                             | Birim  |
|-----------|---------|-----------------------------------|--------|
| 1         | TOUT    | Baca gazı sıcaklığı               | °C     |
| 2         | MAIR    | Hava akışı                        | kg/s   |
| 3         | MWT     | Gaz türbin elektrik üretimi       | kW     |
| 4         | MWC     | Hava kompresörü elektrik tüketimi | kW     |
| 5         | MNG     | Gaz türbini doğalgaz akımı        | kg/s   |
| 6         | MSTEAM  | HRSG buhar çıkış akımı            | kg/s   |
| 7         | M1NG    | Gaz türbini doğalgaz akımı        | kmol/s |
| 8         | M1STEAM | HRSG buhar çıkış akımı            | kmol/s |
| 9         | MNG2    | HRSG doğalgaz akımı               | kg/s   |
| 10        | M1NG2   | HRSG doğalgaz akımı               | kmol/s |

Tablo 5. 2: Optimizasyonda kullanılan özellikler.

| Özellik | İsim   | Tanım                          | Birim  |
|---------|--------|--------------------------------|--------|
| 1       | HSTEAM | HRSG buhar çıkış entalpisi     | kJ/kg  |
| 2       | HKBS   | HRSG su giriş entalpisi        | kJ/kg  |
| 3       | HREF1  | Doğalgaz referans entalpisi    | kJ/kg  |
| 4       | SREF1  | Doğalgaz referans entropisi    | kJ/kgK |
| 5       | HREF2  | Buhar referans entalpisi       | kJ/kg  |
| 6       | SREF2  | Buhar referans entropisi       | kJ/kgK |
| 7       | HREF3  | Baca gazı referans entalpisi   | kJ/kg  |
| 8       | SREF3  | Baca gazı referans entropisi   | kJ/kgK |
| 9       | SSTEAM | HRSG buhar çıkış entropisi     | kJ/kgK |
| 10      | SKBS   | HRSG su giriş entropisi        | kJ/kgK |
| 11      | HNG    | Gaz türbini doğalgaz entalpisi | kJ/kg  |
| 12      | SNG    | Gaz türbini doğalgaz entropisi | kJ/kgK |

### 5.3. Optimizasyonun Amaç Fonksiyonu

Tablo 5.1’de görülen parametreler kullanılarak optimize edilecek amaç fonksiyonu sisteme tanıtıldı. Bu amaçla, optimizasyon programında bulunan Fortran giriş protokolü kullanıldı. Programa tanıtılan amaç fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

$$EX1 = -MWT - MWC \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de kojenerasyon prosesinde üretilen net elektrik miktarı hesaplanmaktadır.

$$EX2 = MSTEAM((HSTEAM - HREF2)) - 298x(SSTEAM - SREF2)) + M1STEAMx8636 \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de destek yanmalı atık ısı kazanında üretilen buharın ekserji değeri hesaplanmaktadır.

$$EX3 = MKBS((HKBS - HREF2)) - 298x(SKBS - SREF2)) + M1STEAMx45 \quad (5.3)$$

Denklem 5.3’de destek yanmalı atık ısı kazanına giren kazan beslem suyunun ekserji değeri hesaplanmaktadır.

$$EX4 = MNG((HNG - HREF1)) - 298x(SNG - SREF1)) + M1NGx824348 \quad (5.4)$$

Denklem 5.4’de gaz türbinine giren doğalgazın ekserji değeri hesaplanmaktadır.

$$EX5 = MNG2((HNG - HREF1)) - 298x(SNG - SREF1)) + M1NG2x824348 \quad (5.5)$$

Denklem 5.5’de destek yanmalı atık ısı kazanına giren doğalgazın ekserji değeri hesaplanmaktadır.

$$EX = (EX1 + EX2)/(EX3 + EX4 + EX5) \quad (5.6)$$

Denklem 5.6’da ise önceki denklemler kullanılarak ekserji verimi hesaplanmaktadır. Bu denklem programa amaç fonksiyonu olarak tanıtılmaktadır.

Programa amaç fonksiyonu tanıtıldıktan sonra programın amaç fonksiyonunu maksimize etmesi gerektiği girildi. Hedefin maksimizasyon olduğu belirtildikten sonra maksimizasyon yaparken hangi parametrelerde limit olduğu programa tanıtıldı.

## 5.4. Optimizasyonda kullanılan Kısıtlamalar

Amaç fonksiyonu optimizasyon programı ile maksimize edilmeye çalışırken programa tanıtılırken aynı zamanda fonksiyon sonucunu kısıtlayan parametreler sisteme girildi. Program optimizasyon yaparken girilen kısıtlamalara göre çalışmaktadır. Girilen kısıtlayıcılar tezin bu bölümünde anlatıldı.

Tablo 5. 3: Optimizasyonda kullanılan kısıtlamalar.

| Kısıtlayıcı                             | İşlem              | Değer    |
|---|--------------------|----------|
| Toplam elektrik üretimi                 | Büyük veya eşittir | 40000 kW |
| Gaz türbini yanmış hava giriş sıcaklığı | Küçük veya eşittir | 1060 °C  |

Programa ilk olarak girilen kısıtlayıcı rafineri ihtiyacı olan elektrik gücünün 40MW’ının gaz türbininden sağlanmasının istenmesidir.

Optimizasyon programına girilen bir diğer kısıtlayıcı ise türbine giren yanmış havanın sıcaklığıdır. Bu sıcaklığın çok yüksek olması durumunda türbin kanatları malzemesi zarar görecektir. Türbine giren havanın sıcaklığı 1060 °C olarak limitlendi.

## 5.5. Optimizasyon Değişkenleri

Optimizasyon programına amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcılar girildikten sonra en önemli bölüm olan değişkenlerin ne olduğu ve değişkenlerin hangi aralıkta değiştirilebileceği programa tanıtıldı.

Tablo 5. 4: Optimizasyon değişkenleri.

| # | Değişken Adı               | Birim | Alt Limit | Üst Limit |
|---|----------------------------|-------|-----------|-----------|
| 1 | Gaz Türbini Hava Akımı     | kg/h  | 0         | 525000    |
| 2 | Gaz Türbini Doğalgaz Akımı | kg/h  | 0         | 12000     |
| 3 | HRSG Su Akımı              | kg/h  | 0         | 165000    |
| 4 | HRSG Doğalgaz Akımı        | kg/h  | 0         | 6000      |

## 5.6. Optimizasyon Sonuçları

Tezin optimizasyon bölümünde Aspen Plus programında prosesin simülasyon modeli tekrar yapıldı, optimize edilecek amaç fonksiyonu programa girildi, optimizasyonun değişkenleri ve kısıtlayıcıları tanıtıldı.

Program bu bilgiler kapsamında amaç fonksiyonu olan ekserji verimini maksimize etmiştir. Maksimize edilen amaç fonksiyonu yani ekserji veriminin değeri Tablo 5.4’de verilmektedir.

Tablo 5. 5: Optimizasyon sonuçları.

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Amaç Fonksiyon Sonucu | 0.6215 |
| İterasyon Sayısı      | 5      |

Tablo 5.5’de görüldüğü üzere amaç fonksiyonun sonucu 0.621 olarak gerçekleşmiştir. Optimizasyon çalıştırılmadan önce hesaplanan ekserji verimi %50 olarak gerçekleşmiş iken optimizasyon sonrası bu verim %62’ye çekilmiştir.

Program optimizasyonu iterasyon yaparak çözmektedir. Çalıştırılan optimizasyon sırasında programın hangi iterasyonları yaptığı Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5. 6: Optimizasyon iterasyon sonuçları.

| İterasyon | Amaç Fonksiyonu | Kuhn-Tucker Hatası | Lagrangian Fonksiyonu | Kısıtlayıcı 1 | Kısıtlayıcı 2 | Kısıtlayıcı 3 | Değişken 1 | Değişken 2 | Değişken 3 | Değişken 4 |
|-----------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 1         | 0.585348        | 0.208796           |                       | 10272         | 90.36760      | -144.8560     | 485543     | 10800      | 16500      | 4800       |
| 2         | 0.621432        | 0.005044           | 0.620633              | -117          | -1.04694      | 3.05338       | 486150     | 8753.37    | 16500      | 4779.82    |
| 3         | 0.622112        | 2.00E-07           | 0.622111              | 0             | -0.01350      | 0.01138       | 484991     | 8773.81    | 16500      | 4757.64    |
| 4         | 0.622113        | 2.00E-07           | 0.622113              | 0             | -0.00013      | 0.00012       | 484982     | 8773.79    | 16500      | 4757.64    |
| 5         | 0.622113        | 2.00E-07           | 0.622113              | 0             | -0.00013      | 0.00012       | 484982     | 8773.79    | 16500      | 4757.64    |

## 6. GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi Kuvvet Santrali ünitesinin simülasyon modeli çıkarıldı ve Aspen HYSYS programı kullanılarak proses simülasyonu yapıldı. Programdan alınan entalpi vb. özellikleri doğrulamak adına sistemin kütle, enerji ve ekserji denklilikleri el ile tekrar çıkarıldı. Elde edilen sonuçlar arasında fark bulunmadığından simülasyon programından elde edilen verilerin kullanılmasına karar verildi.

Simülasyon çalışmasının ve denkliliklerin çıkartılmasının ardından bütün akımların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin olduğu akım tabloları hazırlandı. Bu özellikler kullanılarak bütün ekipmanların enerji ve ekserji verimleri hesaplandı. Kondenserli buhar türbini hariç tüm ekipmanların enerji verimleri %95-%98 arası hesaplandı. Hesaplanan enerji ve ekserji verimleri kıyaslanarak aralarında bir ilişki olup olmadığı araştırıldı. Yapılan kıyaslamalar sonucu enerji ve ekserji verimi arasında bir korelasyon olmadığı görüldü.

Ekserji kayıp hesabı yapılan sistemde toplamda yaklaşık 126 MW ekserji kayıp hızı olduğu hesaplandı. Konvansiyonel kazan ünitesi 55 MW ile ekserji kayıp hızının %43'ünü oluşturmuştur. Basit çevrimde ekserji verimi %30 hesaplanırken kombine çevrim çalışması durumunda verim %53 olarak gerçekleşmiştir. Bu değer literatürde yapılan diğer çalışmalarda bulunan değerlerle kıyaslandığında hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Sisteme toplam giren, sistemden kaybedilen ve sistemden çekilen toplam ekserji hızının dağılımı Grassmann Diyagramı gösterimi ile gösterilmiştir.

Sistemde yapılan iyileştirme açısından yapılan bir değişiklik konvansiyonel kazan kullanımının iptal edilip atık ısı kazanının destek yanmalı atık ısı kazanına çevrilmesidir. Bir önceki bölümde ekserji analizi yapıldığında en verimsiz ekipmanın konvansiyonel kazan olduğu görülmüştür. Yapılan değişiklik sayesinde sistemin genelinde 21 MW ekserji kayıp hızı düşüşü gerçekleşmiştir. Yeni durumda en verimsiz ekipman 39 MW ekserji kayıp hızıyla gaz türbini yanma odası olarak değişti. Bu ekipmanın verimi artırma adına piyasada yapılan değişiklikler arasında gaz türbininden çıkan sıcak havayla yanma odasına giren havanın ısıtılması gösterilebilir. Bu durumda yanma odasına daha sıcak hava girdiğinden dolayı yanma verimi artmaktadır. Destek yanmalı atık ısı kazanına geçiş yapılmasıyla sağlanan

ekserji verim düşüşünün en büyük etkeni gaz türbininden atılan %15 oksijen ihtiva eden havanın %10'a düşürülmesi ve atık ısı kazanı baca gazı sıcaklığının 195 °C'den 95 °C'ye düşmesidir.

Enerji ve ekserji incelemelerinin yapılmasının ardından sistemin ekserji verimi açısından optimizasyonu yapıldı. Bu çalışmada destek yanmalı atık ısı kazanı olan sistem kapsama alındı. Optimizasyon çalışması için Aspen Plus programı kullanılmıştır. Öncelikle destek yanmalı atık ısı kazanılı sistem tekrar modellendi. Optimizasyonda ilk adım olarak amaç fonksiyonu belirlendi. Ekserji veriminin maksimizasyonu amaç fonksiyonu olarak seçildi. Ardından optimizasyonda kullanılacak değişkenler ve kısıtlayıcılar belirlendi. Değişken olarak gaz türbinine giren hava ve doğalgazın akımı ve atık ısı kazanına giren kazan besleme suyu ve doğalgaz akımı olarak belirlendi. Kısıtlayıcı olarak ise sistemin toplam elektrik üretimi ve gaz türbinine giren hava sıcaklığı seçilmiştir.

Optimizasyon programı Lagrange çarpanları metodunu kullanarak problemi çözmüştür. Çözüme ulaşmak için program 5 adet iterasyon yapmıştır. Optimizasyon öncesinde %53 olan ekserji verimi %62'ye yükselmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bilgen E., (2000), “Exergetic and engineering analyses of gas turbine based cogeneration systems”, Energy, 25 (2000), 1215-1229
- [2] Boyce M.P., (2002), “Gas Turbine Engineering Handbook”, 2nd Edition, Gulf Professional Publishing
- [3] Web 1, (2014), [http://tr.wikipedia.org/wiki/Gaz\\_t%C3%BCrbinli\\_motorlar](http://tr.wikipedia.org/wiki/Gaz_t%C3%BCrbinli_motorlar), (Erişim Tarihi: 18/02/2015)
- [4] Web 2, (2014), <http://www.power-eng.com/articles/2014/09/ge-sells-first-ha-class-gas-turbines-in-us-market.html>, (Erişim Tarihi: 18/02/2015)
- [5] Ganapathy V., (2003), “Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications and Calculations”, 1st Edition, Marcel Deccer Inc.
- [6] Web 3, (2014), <http://http-server.carleton.ca/~dkarman/Module/Public/oil2/-1/boiler/boiler.html>, (Erişim Tarihi: 23/02/2015)
- [7] Web 4, (2013), <https://en.wikipedia.org/wiki/Deaerator>, (Erişim Tarihi:23/02/-2015)
- [8] Web 5, (2014), <http://www.lenntech.com/applications/process/boiler/membranecontractors.htm>, (Erişim Tarihi: 23/02/2015)
- [9] Web 6, (2015), [http://www.fischerequipment.com/boilers\\_BW.php](http://www.fischerequipment.com/boilers_BW.php), (Erişim Tarihi: 27/02/2015)
- [10] Kehlhofer R., Hannemann F., Stirnimann F., Rukes B., (2009), “Combined Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants”, 3rd Edition, Penwell Books
- [11] Web 7, (2015), [http://commons.wikimedia.org//File:Turbine\\_generator\\_systems1.png](http://commons.wikimedia.org//File:Turbine_generator_systems1.png), (Erişim Tarihi: 27/02/2015)
- [12] Web 8, (2013), [http://www.tnorthconsulting.com/power\\_services/turbine\\_generator\\_balance\\_of\\_plant.php](http://www.tnorthconsulting.com/power_services/turbine_generator_balance_of_plant.php), (Erişim Tarihi: 23/04/2015)
- [13] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., (1996), “Thermal Design And Optimization”, 1st Edition, Wiley Publication
- [14] Okechukwu E., Imuentinyan O., (2013), “Exergy analysis of Omotosho phase 1 gas thermal power plant”, International Journal of Energy and Power Engineering, 2 (5), 197-203



- [15] Yılmazoğlu M., Amirabedin E., (2011), “Second law and sensitivity analysis of a combined cycle power plant in Turkey”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31 (2), 41-50
- [16] Ameri M., Enadi N., (2012), “Thermodynamic modeling and second law based performance analysis of a gas turbine power plant (exergy and exergoeconomic analysis)”, *Journal of Power Technologies*, 92 (3), 183-191
- [17] Ebadi M.J, Gorji-Bandpy M., (2005), “Exergetic analysis of gas turbine plants”, *Int. J. Exergy*, 2 (1), 31-39
- [18] Chand V.T., Sankar B.R., Reddy M.R., (2013), “First law and second law analysis of gas turbine plant”, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, 3 (4), 415-420
- [19] Kumar A., Kachhwaha S.S., Mishra R.S., (2010), “Thermodynamic analysis of a regenerative gas turbine cogeneration plant”, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 69 (1), 225-231

## ÖZGEÇMİŞ

Çağatay YAYLACI 1989 Adana doğumludur. 2007 yılında başladığı Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümünden 2011 yılında lisans diplomasını almıştır. 2012 yılında eski adıyla Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, yeni adıyla Gebze Teknik Üniversitesi ( GTÜ ) Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2011-2013 yılları arasında Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'de işletme mühendisi olarak çalışmış olup şuanda TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi'nde proses şefi olarak çalışmaktadır.

# EKLER

## Ek A: Kütle, Enerji ve Ekserji Denkliği ve Hesaplamaları

Simülatör kullanılarak prosesin model simülasyon modeli oluşturulmuş ve saha değerleri kullanılarak kütle ve enerji denkliği program tarafından otomatik olarak kuruldu.

Tez kapsamında kütle ve enerji denklileri el ile tekrar yapılmıştır. Ekserji değerleri, proses simülasyon programında hesaplanan entalpi ve entropi değerleri kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan ekserji değerleri kullanılarak ekserji verimleri ve kayıpları hesaplandı.

Çalışmanın bu bölümünde kütle, enerji ve ekserji ile ilgili yapılan hesaplamalar paylaşıldı.

### Ek A.1. Kütle Denkliği

#### Ek A.1.1. Gaz Türbini Kütle Denkliği

$$m_1 = m_2 \quad (A1.1)$$

$$m_4 = m_5 + m_2 + m_3 \quad (A1.2)$$

#### Ek A.1.2. Atık Isı Kazanı Kütle Denkliği

$$m_{12} = m_{13} = m_{14} = m_{15} = m_{16} \quad (A1.3)$$

$$m_5 = m_6 = m_7 = m_8 = m_9 = m_{10} \quad (A1.4)$$

#### Ek A.1.3. Degazör ve Kazan Besleme Suyu Sistemi Kütle Denkliği

$$m_{10} = m_{11} = m_{12} \quad (A1.5)$$

$$m_{20} = m_{19} = m_{17} + m_{18} \quad (A1.6)$$

#### **Ek A.1.4. Konvansiyonel Kazan Kütle Denkliği**

$$m_{20} + m_{21} = m_{22} + m_{23} \quad (\text{A1.7})$$

#### **Ek A.1.5. Buhar Türbinleri Kütle Denkliği**

$$\begin{aligned} m_{25} = m_{26}, m_{27} = m_{28}, m_{29} = m_{30}, m_{31} = m_{32}, m_{33} = m_{34} = m_{38} \\ m_{24} = m_{25} + m_{27} + m_{28} + m_{31} + m_{33} \\ m_{36} = m_{37} \end{aligned} \quad (\text{A1.8})$$

#### **Ek A.2. Enerji Denkliği**

##### **Ek A.2.1. Gaz Türbini Enerji Denkliği**

##### **Ek A.2.1.1 Hava Kompresörü Enerji Denkliği**

Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (\text{A2.1})$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;

$$\Delta H = Q + W \quad (\text{A2.2})$$

Kompresördeki sıkıştırma işleminin adyabatik olduğu kabul edilirse;

$$\Delta H = W \quad (\text{A2.3})$$

Tez kapsamında, kompresör çıkışındaki havanın özellikleri bilinmekte ve bu değerler kullanılarak kompresörün verimi hesaplanabilmektedir. Kompresörün girişindeki ve çıkışındaki havanın entalpisini hesaplamak için “ Perry’s Chemical Engineering Handbook “ da verilen cp tabloları kullanıldı.

$$m_1(cp_2T_2 - cp_1T_1) = W \quad (\text{A2.4})$$

### Ek A.2.1.2 Yanma Mahalli Enerji Denkliği

Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (\text{A2.5})$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;

$$\Delta H = Q + W \quad (\text{A2.6})$$

Yanma odasında herhangi bir iş olmadığı kabul edilirse;

$$\Delta H = Q \quad (\text{A2.7})$$

$$m_4h_4 - m_3h_3 - m_2h_2 = Q \quad (\text{A2.8})$$

Formüldeki Q değeri yanma odasında gerçekleşen yanma reaksiyonunda ortama verilen ısı miktarıdır. Bu değer için doğalgazın alt ısı değeri alındı.

$$m_4h_4 - m_3h_3 - m_2h_2 = m_3LHV \quad (\text{A2.9})$$

Yukarıdaki formülden yanma odasından çıkış yani gaz türbinin girişindeki akımın entalpisi hesaplandı.

### Ek A.2.1.3 Gaz Türbini Enerji Denkliği

Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (\text{A2.10})$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;

$$\Delta H = Q + W \quad (\text{A2.11})$$

Türbindeki genişleme işleminin adyabatik olduğu kabul edilirse;

$$\Delta H = W \quad (\text{A2.12})$$

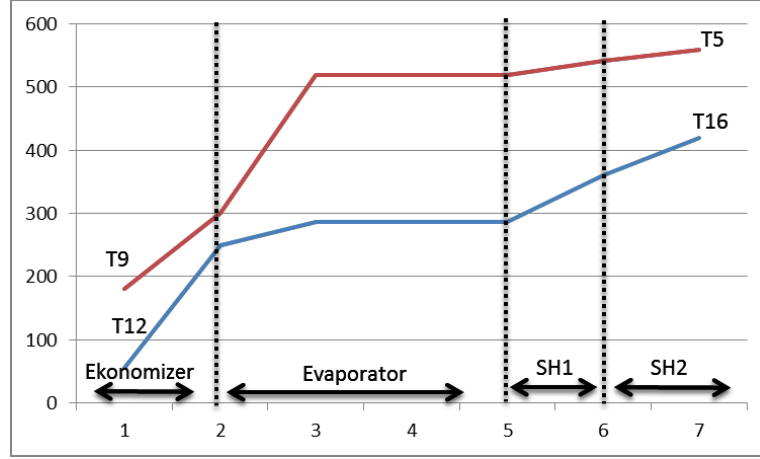
Tez kapsamında, türbin çıkışındaki havanın özellikleri bilinmekte ve bu değerler kullanılarak türbin verimi hesaplanabilmektedir. Türbin girişindeki ve çıkışındaki havanın entalpisini hesaplamak için “ Perry’s Chemical Engineering Handbook “ da verilen cp tabloları kullanıldı.

$$m_1(cp_5T_5 - cp_4T_4) = W \quad (\text{A2.13})$$

### Ek A.2.2. Atık Isı Kazanı Enerji Denkliği

Atık ısı kazanında enerji dengesi yapılırken kazan tek bir eşanjör olarak kabul edilmiştir. Kazana giren suyun ve çıkan buharın özellikleri bilinmektedir. Bu bilgiler kullanılarak LMTD yöntemi ile baca gazı sıcaklığı hesaplandı.

Atık ısı kazanı ters akışlı bir eşanjördür. Atık ısı kazanlarında tüpler genellikle finli yapılarak yüzey alanı artırılır. Şekil A2.1’de atık ısı kazanının sıcaklık diyagramı verilmektedir.



Şekil A2. 1: Atık ısı kazanının sıcaklık diyagramı.

Kazandaki su tarafının gaz tarafından absorbladığı ısı miktarı;

$$Q_a = m_{12}(H_{16} - H_{12}) \quad (A2.13)$$

Su tarafının aldığı ısı miktarı ile gaz tarafının verdiği ısı miktarı birbirine eşit kabul edilirse; ( çevreye herhangi bir ısı kaybı olmadığı kabul edilirse )

$$Q_v = Q_a = m_{12}(H_{16} - H_{12}) = UA\Delta T_{lm} \quad (A2.14)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_5 - T_{16}) - (T_9 - T_{12})}{\ln \left( \frac{(T_5 - T_{16})}{(T_9 - T_{12})} \right)} \quad (A2.15)$$

Yukarıdaki formül kullanılarak  $T_9$  yani baca gazı çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır. Ayrıca, formülde bulunan U ve A katsayıları, kazan firmasının vermiş olduğu ısı transfer katsayısı ve yüzey alanıdır.

### **Ek A.2.3. Degazör ve Kazan Besleme Suyu Sistemi Enerji Denkliği**

Bu sistemde bulunan degazör ve 2 adet kazan besleme suyu pompasının enerji denkliği bu bölümde anlatıldı.

#### **Ek A.2.3.1 Degazör Enerji Denkliği**

Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (A2.16)$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;

$$\Delta H = Q + W \quad (A2.17)$$

Degazörde herhangi bir iş yapılmadığı ve ortama ısı kaybı olmadığı kabul edilirse;

$$\Delta H = 0 \quad (A2.18)$$

$$T_{19}H_{19} = m_{18}H_{18} + m_{17}H_{17} \quad (A2.19)$$

Önceki bölümlerde degazörde yapılan kütle denkliği formülü ile yukarıdaki enerji denkliği formülü simültane çözülür ise degazörde sıyrma buharı ( 17 nolu akım ) olarak kaç ton buhar kullanılması gerektiği hesaplandı.

#### **Ek A.2.3.2 Kazan Besleme Suyu Pompaları Enerji Denkliği**

Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (A2.20)$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;



$$\Delta H = Q + W \quad (\text{A2.21})$$

Pompalardan ortama ısı kaybı olmadığı kabul edilirse;

$$\Delta H = W \quad (\text{A2.22})$$

$$m_{11}(H_{12} - H_{11}) = W_1 \quad (\text{A2.23})$$

$$m_{19}(H_{20} - H_{19}) = W_2 \quad (\text{A2.24})$$

Pompa verimleri sabit %98 alınarak yukarıda hesaplanan şaft gücünden motor gücüne geçildi.

$$W_a = \frac{W_a}{n} \quad (\text{A2.25})$$

#### **Ek A.2.4. Konvansiyonel Kazan Enerji Denkliği**

Kazana giren suyun, çıkan buharın ve yakılan yakıtın özellikleri bilinmektedir. Tez kapsamında bu veriler kullanılarak baca gazının çıkış sıcaklığı hesaplandı.

Yakıttan alınan enerji;

$$Q = m_{21}LHV \quad (\text{A2.26})$$

Yukarıdaki formülde LHV değeri, yakıt olarak kullanılan doğalgazın alt ısı değerini ifade etmektedir.

Kazandaki su tarafının gaz tarafından absorbladığı ısı miktarı;

$$Q_a = m_{20}(H_{23} - H_{20}) \quad (\text{A2.27})$$

Su tarafının aldığı ısı miktarı ile gaz tarafının verdiği ısı miktarı birbirine eşit kabul edilirse; ( çevreye herhangi bir ısı kaybı olmadığı kabul edilirse )

$$Q_v = Q_a = m_{20}(H_{23} - H_{20}) = UA\Delta T_{lm} \quad (\text{A2.28})$$

$$T_{lm} = \frac{(T_{21} - T_{23}) - (T_{22} - T_{20})}{\ln\left(\frac{(T_{21} - T_{23})}{(T_{22} - T_{20})}\right)} \quad (\text{A2.29})$$

Yukarıdaki formül kullanılarak  $T_{22}$  yani baca gazı çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır. Ayrıca, formülde bulunan U ve A katsayıları, kazan firmasının vermiş olduğu ısı transfer katsayısı ve yüzey alanıdır.

### Ek A.2.5. Buhar Türbinleri Enerji Denkliği

Tez kapsamında bulunan 3 adet buhar türbini için yapılan enerji denkliği, bu bölümde tek bir türbin için gösterilmiştir. Mekanik enerji dengesi;

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad (\text{A2.30})$$

Bu denklemde kinetik ve potansiyel enerjideki değişimlerin ihmal edilirse;

$$\Delta H = Q + W \quad (\text{A2.31})$$

Türbindeki genleşme işleminin adyabatik olduğu kabul edilirse;

$$\Delta H = W \quad (\text{A2.32})$$

Tez kapsamında, türbin çıkışındaki havanın özellikleri bilinmekte ve bu değerler kullanılarak türbin verimi hesaplanabilmektedir. Türbin girişindeki ve çıkışındaki havanın entalpisini hesaplamak için “ Perry’s Chemical Engineering Handbook “ da verilen cp tabloları kullanıldı.

$$m_{25}(cp_{26}T_{26} - cp_{25}T_{25}) = W \quad (\text{A2.33})$$

### Ek A.3. Ekserji Denkliği

Bu bölümde, tezin asıl amaçlarından biri olan ekserji dengesi için kullanılan formüller verilmiştir. Ekserji denkliğinde, simülatörün hesapladığı entalpi ve entropi değerleri kullanıldı.

Bir akışkanın toplam ekserjisi aşağıdaki şekilde formülize edildi.

$$E = E^{PH} + E^{CH} + E^{PT} + E^{KN} \quad (A3.1)$$

- $E^{PH}$  : Fiziksel ekserji
- $E^{CH}$  : Kimyasal ekserji
- $E^{PT}$  : Potansiyel ekserji
- $E^{KN}$  : Kinetik ekserji

Tez kapsamında potansiyel ve kinetik ekserji ihmal edildi.

Steady state ekserji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edildi.

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (A3.2)$$

- $E_o$ : Çıkış akışkanındaki ekserji
- $E_i$ : Giriş akışkanındaki ekserji
- $E_q$ : Çevreyle yapılan ısı transferinden kaynaklanan ekserji
- $W$ : Ekipmanın yaptığı iş
- $E_d$ : Yok edilen ekserji

Fiziksel ekserji hesaplanırken kullanılan formül;

$$E^{PH} = m[(h - h_o) - T_o(s - s_o)] \quad (A3.3)$$

Formülde kullanılan  $h_o$ ,  $T_o$  ve  $s_o$  değerleri, referans seçilen çevre koşullarındaki parametrelerdir. Tez kapsamında çevre sıcaklığı 25 °C, çevre basıncı ise 1 atm olarak alındı.

Fiziksel ekserji akışkanın sahip olduğu basınç ve sıcaklıkla bağlantılıyken, kimyasal ekserji ise akışkanın kompozisyonu ile bağlantılıdır.

Kimyasal ekserji denklemleri aşağıda verilmektedir.

$$E^{CH} = m[xE_x^{CH} + RT_0 x \ln x] \quad (A3.4)$$

Burada;

- x: Mol fraksiyonu
- R= Gaz sabiti
- T<sub>0</sub>= Referans sıcaklığı
- E<sup>CH</sup>= Toplam kimyasal ekserji

Maddelerin kimyasal ekserjileri “ Thermal Design and Optimization “ adlı kitaptan alındı. Karışımların kimyasal ekserjileri ise kitaptan alınan değerler ve yukarıdaki formül kullanılarak hesaplandı.

### Ek A.3.1. Gaz Türbini Ekserji Denkliği

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (A3.5)$$

Ortama ısı kaybı olmadığı kabul edilirse;

$$E_o - E_i - W = E_D \quad (A3.6)$$

$$E_5 - E_1 - E_3 - W_C + W_T = E_D \quad (A3.7)$$

Yukarıdaki denklik kullanılarak gaz türbini sisteminde yok edilen ekserji miktarı hesaplanmaktadır. Bu denklemde bulunan akımların ekserjileri fiziksel ekserji ile kimyasal ekserjilerinin toplamına eşittir.

### Ek A.3.2. Atık Isı Kazanı Ekserji Denkliği

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (\text{A3.8})$$

Ortama ısı kaybı olmadığı ve dışarıdan herhangi bir iş olmadığı kabul edilirse;

$$E_o - E_i = E_D \quad (\text{A3.9})$$

$$E_{16} + E_9 - E_5 - E_{12} = E_D \quad (\text{A3.10})$$

Yukarıdaki denklik kullanılarak atık ısı kazanında yok edilen ekserji miktarı hesaplanmaktadır.

### **Ek A.3.3. Degazör ve Kazan Besleme Suyu Sistemi Ekserji Denkliği**

Bu sistemde bulunan degazör ve 2 adet kazan besleme suyu pompasının ekserji denkliği bu bölümde anlatılmıştır.

#### **Ek A.3.3.1 Degazör Ekserji Denkliği**

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (\text{A3.11})$$

Ortama ısı kaybı olmadığı ve dışarıdan herhangi bir iş olmadığı kabul edilirse;

$$E_o - E_i = E_D \quad (\text{A3.12})$$

$$E_{19} - E_{17} - E_{18} = E_D \quad (\text{A3.13})$$

#### **Ek A.3.3.2 Kazan Besleme Suyu Pompaları Ekserji Denkliği**

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (\text{A3.14})$$

Ortama ısı kaybı olmadığı kabul edilirse;

$$E_o - E_i + W_p = E_D \quad (\text{A3.15})$$

$$E_{12} - E_{11} + W_p = E_D \quad (\text{A3.16})$$

$$E_{20} - E_{19} + W_p = E_D \quad (\text{A3.17})$$

#### **Ek A.3.4. Konvansiyonel Kazan Ekserji Denkliği**

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (\text{A3.18})$$

$$E_o - E_i = E_D \quad (\text{A3.19})$$

$$E_{23} + E_{22} - E_{20} - E_{21} = E_D \quad (\text{A3.20})$$

#### **Ek A.3.5. Buhar Türbinleri Ekserji Denkliği**

Tez kapsamında bulunan 3 adet buhar türbini için yapılan ekserji denkliği, bu bölümde tek bir türbin için gösterilmektedir.

Genel ekserji denkliği;

$$E_o - E_i + E_q - W - E_D = 0 \quad (\text{A3.21})$$

Ortama ısı kaybı olmadığı kabul edilirse;

$$E_o - E_i - W = E_D \quad (\text{A3.22})$$

$$E_{26} - E_{25} + W_T = E_D \quad (\text{A3.23})$$

## **Ek B: Optimizasyon Teknikleri**

Tez kapsamında yapılan optimizasyon çalışmasında kısıtlayıcı optimizasyon tekniği kullanıldı. Bu teknikle beraber “Langrange Fonksiyonları” ve “Kuhn-Tucker Gerek Şartları” kullanıldı. Tezin bu bölümünde kullanılan metodlar hakkında temel bilgiler verilmiştir.

### **Ek B.1. Kısıtlı Optimizasyon**

Optimizasyonda temel amaç bir fonksiyonu minimize veya maksimize etmektir. Optimizasyon yapılırken herhangi bir kısıt olmayacağı gibi kişi tarafından belirlenen parametreler optimizasyonu kısıtlayabilir.

Kısıtlı optimizasyon problemleri, kısıtlayıcının tipine bağlı olarak eşitlik kısıtlayıcı ve eşitsizlik kısıtlayıcı olmak üzere ikiye ayrılır ve her iki durum için farklı yaklaşımlar optimum çözümü elde etmek için kullanılır.

### **Ek B.2. Eşitlik Kısıtlayıcı Optimizasyon**

Bir optimizasyon probleminde kısıtlayıcı fonksiyon sayısı “ $m$ ”, tasarım değişkeni sayısı ise “ $n$ ” olsun. Optimum çözümü elde edebilmek için  $n > m$  olmalıdır. Eğer  $m > n$  ise problem aşırı tanımlanmış olur, yani çok fazla sayıda kısıtlayıcı vardır ve problemin çözümü yoktur.

Eşitlik kısıtlayıcı optimizasyon problemlerinin çözümünde çoğunlukla aşağıdaki metotlardan biri kullanılmaktadır.

- Direkt yerleştirme metodu
- Kısıtlayıcı değerlendirme
- Lagrange çarpanları

Optimizasyon problemleri için seçilen yönteme bağlı olarak gerek ve yeter şartları tanımlanır.

## Ek B.2.1. Lagrange arpanları

Optimizasyon problemlerinde kısıtlayıcısı olan bir amaç fonksiyonunun minimum veya maksimum değerinin bulunabilmesi için Lagrange arpanları metodu kullanılır.

Maksimize edilmeye çalışılan bir  $f(x,y)$  fonksiyonu ve kısıtlayıcı fonksiyon  $g(x,y)=c$  olsun. Bu iki denklemin ve Lagrange arpanı  $\lambda$ 'nin birleşimi olan ve fonksiyon;

$$\Lambda(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda * ((g(x, y) - c) \quad (\text{B2.1})$$

olur.

Bu denklemin maksimum olduğu nokta fonksiyonun sabit olduğu noktadır. Bu nokta, fonksiyonun kısmi türevlerinin sıfıra eşitlenmesi ile bulunabilir.



## Ek C: Kimyasal Ekserji Tabloları

Kimyasal ekserji katsayıları Şekil C.1’de gösterilmiştir [13].

| Substance         | Formula                             | Model I <sup>a</sup> | Model II <sup>b</sup> |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Nitrogen          | N <sub>2</sub> (g)                  | 639                  | 720                   |
| Oxygen            | O <sub>2</sub> (g)                  | 3,951                | 3,970                 |
| Carbon dioxide    | CO <sub>2</sub> (g)                 | 14,176               | 19,870                |
| Water             | H <sub>2</sub> O(g)                 | 8,636                | 9,500                 |
| Water             | H <sub>2</sub> O(l)                 | 45                   | 900                   |
| Carbon (graphite) | C(s)                                | 404,589              | 410,260               |
| Hydrogen          | H <sub>2</sub> (g)                  | 235,249              | 236,100               |
| Sulfur            | S(s)                                | 598,158              | 609,600               |
| Carbon monoxide   | CO(g)                               | 269,412              | 275,100               |
| Sulfur dioxide    | SO <sub>2</sub> (g)                 | 301,939              | 313,400               |
| Nitrogen monoxide | NO(g)                               | 88,851               | 88,900                |
| Nitrogen dioxide  | NO <sub>2</sub> (g)                 | 55,565               | 55,600                |
| Hydrogen peroxide | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)   | 133,587              | —                     |
| Hydrogen sulfide  | H <sub>2</sub> S                    | 799,890              | 812,000               |
| Ammonia           | NH <sub>3</sub> (g)                 | 336,684              | 337,900               |
| Oxygen            | O(g)                                | 231,968              | 233,700               |
| Hydrogen          | H(g)                                | 320,822              | 331,300               |
| Nitrogen          | N(g)                                | 453,821              | —                     |
| Methane           | CH <sub>4</sub> (g)                 | 824,348              | 831,650               |
| Acetylene         | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)   | —                    | 1,265,800             |
| Ethylene          | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)   | —                    | 1,361,100             |
| Ethane            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)   | 1,482,033            | 1,495,840             |
| Propylene         | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)   | —                    | 2,003,900             |
| Propane           | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)   | —                    | 2,154,000             |
| n-Butane          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)  | —                    | 2,805,800             |
| n-Pentane         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)  | —                    | 3,463,300             |
| Benzene           | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)   | —                    | 3,303,600             |
| Octane            | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)  | —                    | 5,413,100             |
| Methanol          | CH <sub>3</sub> OH(g)               | 715,069              | 722,300               |
| Methanol          | CH <sub>3</sub> OH(l)               | 710,747              | 718,000               |
| Ethyl alcohol     | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g) | 1,348,328            | 1,363,900             |
| Ethyl alcohol     | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l) | 1,342,086            | 1,375,700             |

Şekil C. 1: Kimyasal ekserji değerleri.