

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BUHAR KAZANLARININ EKSERGOEKONOMİK  
ÇÖZÜMLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Gemi Mak. İşl. Müh. Sinan Eren YALÇIN**

**Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ISI-AKIŞKAN**

**HAZİRAN 2006**

**BUHAR KAZANLARININ EKSERGOEKONOMİK  
ÇÖZÜMLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Sinan Eren YALÇIN**  
**(503041123)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 Mayıs 2006**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Taner DERBENTLİ**  
**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ertuğrul ARSLAN**  
**Yard. Doç. Dr. Erhan BÖKE**

**HAZİRAN 2006**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan ve çalışmam boyunca her zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Taner DERBENTLİ'ye teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca verdikleri destekten dolayı arkadaşlarım Hakkı Ergün ÇEKLİ ve Tibet ERKAN'a teşekkür ederim.

Son olarak, tüm hayatım boyunca her adımında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını hissettiren sevgili annem Hüsniye YALÇIN, babam Atilla YALÇIN, kız kardeşim Sibel Ebru YALÇIN'a ve tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Haziran 2006

Sinan Eren YALÇIN

## İÇİNDEKİLER

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÖNSÖZ</b>   | <b>II</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                       | <b>IV</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                       | <b>V</b>    |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                      | <b>VI</b>   |
| <b>ÖZET</b>  | <b>VII</b>  |
| <b>SUMMARY</b>   | <b>VIII</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2. KAZANLAR</b>   | <b>5</b>    |
| 2.1. Kazan İçinde Su Sirkülasyonuna Göre Sınıflandırma     | 9           |
| 2.2. Kazanların Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması | 9           |
| 2.3. Kazanların Basınca Göre Sınıflandırılması             | 9           |
| 2.4. Buhar Kazanlarının Elemanları                         | 10          |
| 2.5. Kazan İçinde Yanma                                    | 13          |
| 2.6. Akışkan Yataklı Kazanlar                              | 14          |
| 2.7. Buhar Kazanı Elemanları                               | 15          |
| <b>3. TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEME VE EKSERJİ ÇÖZÜMLEMESİ</b>    | <b>20</b>   |
| 3.1. Termodinamik Çözümleme                                | 20          |
| 3.2. Doğalgaz Yanması için Termodinamik Çözümleme          | 21          |
| 3.3. Kömürün Yanması İçin Termodinamik Çözümleme           | 25          |
| 3.4. Ekserji Değerlerinin Hesaplanması                     | 31          |
| 3.5. Giren Kömürün Ekserjisinin Hesabı                     | 39          |
| 3.6. Tersinmezlik  | 40          |
| <b>4. EKONOMİK ÇÖZÜMLEME</b>                               | <b>42</b>   |
| 4.1. Maliyet Denge Denklemi                                | 42          |
| 4.2. Doğalgaz Yakan Kazan İçin Buharın Maliyeti            | 43          |
| 4.3. Kömür Yakan Kazan İçin Buharın Maliyeti               | 44          |
| <b>5. SONUÇLAR VE İRDELEME</b>                             | <b>45</b>   |
| 5.1. Doğalgaz Yanması İçin Elde Edilen Sonuçlar            | 45          |
| 5.2. Kömür Yanması İçin Sonuçlar                           | 52          |
| <b>6. SONUÇ</b>  | <b>60</b>   |
| <b>KAYNAKLAR</b>   | <b>61</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>  | <b>63</b>   |

## TABLO LİSTESİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| <b>Tablo 3.1:</b> Doğalgaz yanması için gerekli olan $H^+$ , a, b, c, d sabitleri (Knache ve diğerleri).....   | 22              |
| <b>Tablo 3.2:</b> Kömürün yanması için gerekli olan $H^+$ , a, b, c, d sabitleri.....  | 28              |
| <b>Tablo 3.3:</b> Doğalgaz yanması durumunda ekserjiyi bulmak için gerekli olan sabitler (Knache ve diğerleri) .....                                       | 33              |
| <b>Tablo 3.4:</b> Kömür yanması durumunda ekserjiyi bulmak için gerekli olan sabitler .  | 37              |
| <b>Tablo 5.1:</b> 1000 kW gücünde doğalgaz yakan kazanda elde edilen en yüksek sıcaklıklar (K) .....   | 45              |
| <b>Tablo 5.2:</b> 1000 kW gücünde doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları için yakıtın ve havanın kütle debilerinin değişimi (kg/s).....   | 45              |
| <b>Tablo 5.3:</b> Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar halinde çıkış halleri için suyun kütle debisi .....              | 46              |
| <b>Tablo 5.4:</b> Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su halinde çıkış için suyun kütle debisi .....                          | 47              |
| <b>Tablo 5.5:</b> Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar çıkışı halindeki tersinmezlik (kW).....                          | 49              |
| <b>Tablo 5.6:</b> Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su çıkışı halindeki tersinmezlik (kW).....                              | 49              |
| <b>Tablo 5.7:</b> Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda kazanda elde edilen en yüksek sıcaklıklar (K) .....  | 53              |
| <b>Tablo 5.8:</b> Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları için yakıtın ve havanın kütle debilerinin değişimi (kg/s).....  | 53              |
| <b>Tablo 5.9:</b> Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar çıkış halleri için suyun kütle debisi (kg/s) .  | 53              |
| <b>Tablo 5.10:</b> Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su çıkış halleri için suyun kütle debisi (kg/s) ..... | 54              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 2.1: Kazanda suya ısı geçişinin T-s diyagramında gösterilişi .....  | 7               |
| Şekil 3.1: Kazan için kontrol hacmi .....   | 20              |
| Şekil 3.2: Kazan içinde suya ısı geçişi.....  | 24              |
| Şekil 3.3: Kazan içinde sıcaklık dağılımı .....   | 24              |
| Şekil 4.1: Kazan için ekserjiye bağlı maliyetin şematik gösterimi.....  | 42              |
| Şekil 5.1: Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi .....                 | 47              |
| Şekil 5.2: Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi.....                      | 48              |
| Şekil 5.3: Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için birim ekserji başına maliyet.....                    | 49              |
| Şekil 5.4: Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için birim ton başına maliyet.....                        | 50              |
| Şekil 5.5: Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için birim ekserji başına maliyet.....                        | 51              |
| Şekil 5.6: Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için birim ton başına maliyet değerleri .....                 | 52              |
| Şekil 5.7: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi..... | 54              |
| Şekil 5.8: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi.....     | 55              |
| Şekil 5.9: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için birim ekserji başına maliyet .....  | 56              |
| Şekil 5.10: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için birim ton başına maliyet.....      | 57              |
| Şekil 5.11: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için birim ekserji başına maliyet .....     | 58              |
| Şekil 5.12: Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için birim ton başına maliyet.....          | 59              |

## SEMBOL LİSTESİ

|  |  |
|--|--|
| <b>a,b,c,d,e</b>                           | :Kömürün bileşenlerinin kütleli oranı                                |
| <b><math>\dot{C}</math></b>                | :Kazandaki i. akımın fiyatı (YTL/s)                                  |
| <b>c</b>                                   | :Birim ekserji başına maliyet (YTL/s)                                |
| <b><math>\dot{E}</math></b>                | :Toplam ekserji (kW)   |
| <b>e</b>                                   | :Spesifik ekserji (kJ/kmol)  |
| <b><math>\dot{E}_{\text{kayıp}}</math></b> | :Tersinmezlik (kW)   |
| <b><math>f_2</math></b>                    | :Birim kütle başına yakıtın fiyatı (YTL/kg)                          |
| <b><math>\bar{h}</math></b>                | :Molar entalpi (kJ/kmol)   |
| <b><math>\bar{h}_0</math></b>              | :Çevre basınç ve sıcaklığında molar entalpi (kJ/kmol)                |
| <b>H</b>                                   | :Entalpi (kW)  |
| <b>LHV</b>                                 | :Alt ısı değeri (kJ/kmol)  |
| <b>M</b>                                   | :Mol kütlesi (kg/kmol)   |
| <b><math>\dot{n}_f</math></b>              | :Yakıtın mol debisi (kmol/s)   |
| <b><math>n_i</math></b>                    | :Kömür içindeki herhangi bir bileşenin mol sayısı (kmol)             |
| <b><math>n'_i</math></b>                   | :1 kg kömür içindeki bileşenlerin mol sayısı                         |
| <b><math>n_{\text{top}}</math></b>         | :Toplam mol sayısı   |
| <b><math>n'_{\text{top}}</math></b>        | :1 kg kömürün bileşenlerinin toplam mol sayısı                       |
| <b><math>P_i</math></b>                    | :Akımın o andaki basıncı (bar)                                       |
| <b><math>P_0</math></b>                    | :Ölü haldeki basınç (bar)  |
| <b><math>\dot{Q}</math></b>                | :Isı Transferi (kW)  |
| <b><math>\bar{s}</math></b>                | :Molar entropi (kJ/kmol.K)   |
| <b><math>\bar{s}_0</math></b>              | :Çevre şartlarında molar entropi (kJ/kmol.K)                         |
| <b>T</b>                                   | :Sıcaklık (K)  |
| <b><math>y_k</math></b>                    | :Bileşenlerin mol oranları   |
| <b><math>y'_k</math></b>                   | :Baca gazlarının yoğunlaşması halinde baca gazları yeni mol oranları |
| <b><math>\dot{Z}</math></b>                | :Kazan fiyatı (YTL/s)  |
| <b><math>\gamma</math></b>                 | :Hava fazlalık katsayısı   |
| <b><math>\eta</math></b>                   | :Verim   |

## ALT İNDİS LİSTESİ

|             |                 |
|-------------|-----------------|
| <b>cp</b>   | :Baca gazları   |
| <b>dif</b>  | :Fark           |
| <b>f</b>    | :Yakıt          |
| <b>k</b>    | :Bileşen        |
| <b>ph</b>   | :Fiziksel       |
| <b>0</b>    | :Çevre şartları |
| <b>top</b>  | :Toplam         |
| <b>maks</b> | :En yüksek      |
| <b>g,ç</b>  | :Giren, çıkan   |

## BUHAR KAZANLARININ EKSERGOEKONOMİK ÇÖZÜMLEMESİ

### ÖZET

Kazanların eksergoekonomik çözümlemesi üretilen sıcak su ya da buharın maliyetini hesaplamak için yapılır. Bu çalışmanın amacı, doğalgaz ve kömür olmak üzere farklı yakıtlar ve değişen hava fazlalık katsayıları için sıcak su veya doymuş buhar üreten kazanlar için sıcak su veya doymuş buharın maliyetinin hesaplanmasıdır.

Çalışmada maliyetleri hesaplamak için kazan, sürekli akışlı açık sistem olarak kabul edilmiştir, doğalgaz ve kömür olmak üzere farklı yakıt girişleri için termodinamik çözümleme yapılmıştır. İncelenen sistem için, termodinamik çözümleme ile amaçlanan, kazan içinde en yüksek yanma sıcaklığının bulunması, kazana giren yakıt, hava ve besleme suyu ile kazandan çıkan baca gazlarının kütle debisinin hesaplanmasıdır. Daha sonra giren ve çıkan akımlar için ekserji çözümlemesi yapılmış ve maliyet denge denklemi yazılarak kazandan farklı çıkış halleri için birim ekserji maliyeti hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bir bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda sıcak su veya doymuş buhar çıkış hali için havanın, suyun kütle debileri, ekserji kayıpları ve birim ekserji maliyetleri tablo halinde ve grafiksel olarak gösterilmiştir.



# **EXERGOCHEMICAL ANALYSIS OF BOILERS**

## **SUMMARY**

Exergoeconomic analysis of boilers was done to determine the cost of hot water and steam produced by the boilers. The aim of the study is to determine the cost of hot water or saturated steam for natural gas and coal fired boilers, for different excess air ratios and different output conditions.

For calculation of the cost of the hot water or steam, firstly the boiler was taken as a steady state steady flow system and thermodynamic calculations for natural gas and coal combustion were done. In the thermodynamic analysis maximum combustion temperature, the mass flow rates of fuel, air, feed water as input streams and combustion products as output streams were calculated for different outlet conditions. Later exergy analysis for input and output streams were done and cost balance equation was written for the boiler. With the help of the cost balance equation, the cost of hot water or steam was calculated for different output conditions. The calculation was done by a computer program.

The mass flow rates of air and water, the exergy destructions and the cost of hot water and steam were given in the form of tables and graphs for different operating conditions in the final section of the thesis. Results were discussed and recommendations were made for further studies.

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmada doğalgaz ve kömür yakan kazanların termoekonomik çözümlemesinin yapılması amaçlanmıştır. Sıcak su ya da buharın maliyetinin bulunması mühendislik açısından çok önemlidir. Bu maliyetleri hesaplamak için termodinamiğin birinci yasası maliyet denge denklemleri ile birlikte kullanılabilir. Fakat, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleşiminden kaynaklanmış bir kavram olan ekserji, maliyet hesaplarında daha uygundur. Çünkü asıl bilinmesi gereken, kaynağın iş potansiyeli veya kaynağın iş yapabilme olanağıdır. Bu bakımdan, ekserji belirli bir halde ve belirli bir miktarda enerjiden elde edilebilecek işi veren bir özelliktir. Çalışmada, kazan kontrol hacmi olarak düşünüldüğü zaman, yakıt, su ve hava kontrol hacmine girmekte buhar ya da sıcak su ve baca gazları sistemden dışarıya çıkmaktadır.

Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması gerçeğinin giderek daha geniş kesimlerce anlaşılması, hükümetleri enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerji savurganlığını önlemeye yöneltmiştir. Bu olgu, bilimsel çevreleri de enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve varolan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye itmiştir (**Çengel ve Boles, 1996**).

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin niceliğiyle ilgilidir, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular ve hal değişimleri sırasında ortaya çıkan enerjinin büyüklüğü ile ilgilenir. Bu yasa, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve uygulamada bir zorluk çıkarmaz. Fakat, sistemlerin sadece birinci yasa ile incelenmesi durumunda enerji analizi hal değişimini anlamak için tam olarak uygun değildir. Termodinamiğin birinci yasası, enerji kaynaklarını kaliteleri yönünden birbirinden ayırmaz. Buna ek olarak, termodinamiğin birinci yasası iş kayıpları ve hal değişimi sırasında enerjinin verimli kullanımını arttırma hakkında yeterli bilgi vermez.

Termodinamiğin ikinci yasası ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir. Yani termodinamiğin ikinci yasası enerji kalitesini ve hal değişimi sırasındaki değer kaybını ifade etmektedir. Termodinamiğin ikinci yasası, herhangi bir enerji biçimi için, sadece bir kısmının işe dönüştüğünü, enerjinin aksine ekserjinin tüketildiğini veya yok edildiğini ve entropinin üretildiğini ifade eder (**Çengel ve Boles, 1996**). Bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma olanağının değerlendirilmesi, bu yasanın inceleme alanı içindedir. Termodinamiğin ikinci yasası, karmaşık termodinamik sistemlerin incelenmesi için güçlü bir araçtır. Bir sistemi incelerken de asıl bilinmesi gereken o sistemin iş potansiyeli yani iş yapabilme olanağıdır.

Sistemin büyüklüğü enerji miktarı ile ifade edilmektedir ve sistemin iş yapabilme potansiyeli ekserji ile ifade edilmektedir (**Çengel ve diğ., 2002**). Kullanılabilirlik, belirli bir halde ve belirli bir miktarda enerjiden elde edilebilecek işi ifade etmektedir. Sistemin belirli bir durumda enerji miktarı her zaman için sabit olur, fakat sistemin ekserjisi çevre şartlarına göre sürekli değişiklik gösterir. Örneğin iki yalıtılmış sistem birleştirildiğinde, sistemin enerji miktarı bu iki ayrı yalıtılmış sistemin enerji miktarının toplamı olur, fakat ekserji miktarı iki sistem aynı durumda olmadığı sürece iki ayrı sistemin ekserji miktarının toplamından az olur.

Ekserji, enerji kaynaklarının kalitesini ortaya koyabilen kullanışlı bir kavramdır. Ekserji sayesinde farklı enerji kaynakları (güneş enerjisi, jeotermal enerji, yakıt enerjisi, elektrik) kendi içinde kıyaslanabilir (**Dinçer ve diğ., 2004**). Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasının birleşimi olan ekserji analizi, enerji sistemleri hakkında iyi bir yaklaşım sağlar ve gerçek verimsiz alanları düzeltilmesi amacı ile işaret eder.

Bu bağlamda ekserji bir sistemden elde edilebilecek en büyük işi ifade eder. Sistemden en büyük iş, sistemin belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) gelmesi ile sağlanır (**Bejan ve diğ., 1996**). Ölü hal, sistemin çevresi ile termodinamik denge halinde bulunduğu durumdur. Ölü halde sistemin basınç ve sıcaklığı çevrenin basınç ve sıcaklığı ile aynıdır. Ölü halde bulunan bir sistemin kullanılabilirliği sıfırdır. Ekserji, sistemdeki enerjinin kalitesini belirlerken, entropi sistemin moleküler düzensizliğini ifade eder. Sistemdeki hal değişimi sırasındaki ekserji de içerideki tersinmezlikler (entropi

üretimi) ve sistem sınırından ısı transferi sayesinde azalır. Tersinmezlikler sistemdeki entropi üretimi ile orantılıdır.

Ekserji analizi termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleşimine dayanır ve genel olarak enerji analizine göre verimsiz durumların daha iyi biçimde belirlenmesini sağlar. Ekserji analizi sadece enerji ile ilgili enerji verimi, enerji gereksinimi gibi parametrelerle ilgilenmez; aynı zamanda ekserji ile ilgili ekserji verimi, entropi üretimi, ekserji kaybı ve ekserji gereksinimi gibi parametrelerle de ilgilenir. Sadece girişteki ve çıkıştaki enerji miktarının bilinmesini gerekli kılan enerji analizinin aksine, ekserji analizinde enerji kaynağının ve çevrenin sıcaklığı bilinmelidir (Wu, 2004). Özellikle karmaşık sistemlerin analizinde enerji analizi tek başına yeterli değildir ve karmaşık sistemin performansını incelerken ve potansiyel olarak geliştirilmesi gereken yerleri incelerken enerji analizi ile birlikte ekserji analizi de gerekir (Wu, 2004).

Olay, enerji yönünden bakıldığında daha büyük enerji daha büyük iş yapabilme yeteneği olarak görülse de aslında bu durum böyle değildir. Çünkü aynı enerji kapasitesinde ısı enerji deposunun ve çevrenin sıcaklığı esas iş yapabilme yeteneğini göstermektedir. Örneğin Carnot ısı makinesi göz önüne alınırsa, Carnot ısı makinesinde verim,

$$\eta = \frac{W_n}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. Buradan  $W_n$  çekilirse,

$$W_n = Q_H \left( 1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad (1.2)$$

bağıntısı bulunmuş olur. Buradan da görüldüğü gibi  $T_L$  sıcaklığı ve  $Q_H$  aynı olduğu durumda  $T_H$  değeri Carnot ısı makinesinin verimini belirler. Başka bir deyişle aynı enerji potansiyelinde,  $T_H$  değeri arttıkça  $W_n$  değeri de artar. Bu da sıcaklığın önemini vurgular. Buradan da görüldüğü gibi enerji miktarından çok enerjinin kalitesi önemlidir (Çengel ve diğ., 2002). Zaten Carnot'unda belirttiği gibi bir ısı makinesinden elde edilecek maksimum kullanılabilir iş, sıcaklık farkı ile orantılıdır.

Bu kural da termodinamiğin ikinci yasasının temelini oluşturmuştur ve ekserji analizi birçok mühendislik sistemlerine uygulanmıştır (**Wall ve Gong ,2001; Wu, 2004**).

## 2. KAZANLAR

Kazan, tanım olarak istenilen basınç, sıcaklık ve miktarda buhar veya sıcak su üreten bir cihazdır. Bunun için herhangi bir yolla elde edilen ısı enerjisinin, kapalı bir kap içindeki sıvıya verilerek bu sıvının buharlaşması temin edilir. Kazanlarda temel amaç, sürekli, kaliteli ve ucuz ısı enerjisi üretimidir. Sürekli üretim, her an uygun enerji ve kütle debisi sağlanarak, kazan işletme ömrü boyunca, en az sayıda hasar, kaza ve durmalarla, emniyet, güvenilirlik ve işlerlik yönünden uygun bir buhar üretiminin gerçekleştirilmesidir. Kaliteli üretim ise, değişen girdi ve yük koşullarında, kazanın ısıl gücünün, ısıl veriminin ve buhar özelliklerinin, sürekli biçimde, tasarımda öngörülen değerlerde tutulmasıdır. Ucuz üretim ise işletme ve yatırım maliyetlerinden oluşan, birim ısı enerjisi toplam üretim maliyetinin, mümkün olan en düşük düzeyde tutulması ile sağlanır. Buhar kazanlarında buhara verilen ısı enerjisi, genellikle çeşitli yakacakların yakılmasından, elektrik enerjisinden, nükleer enerjiden veya eldeki artık bir ısının uygun şekilde değerlendirilmesinden elde edilir (**Genceli, 1985**). Kazanın esas görevi, yanma odasında yakıtın kimyasal enerjisinin ısıya dönüştürülmesi sayesinde ortaya çıkan ısının suya verimli bir şekilde geçmesini sağlamaktır. Yakıt, kazanın yanma odası içinde yakılır ve bu sayede ısı açığa çıkar. Bu ısı da ısıtma yüzeyleri tarafından yutulur. (**Basu ve diğ., 1999**).

İdeal bir kazan aşağıdaki özellikleri içerir (**Woodruff ve diğ., 2005**).

- 1- Yapı yönünden basit olması ve malzemesinin ısıyı iyi bir şekilde suya geçirmesi,
- 2- Yeterli miktarda buhar ve su boşluğunun olması,
- 3- Yanmanın verimli olması ve ısının suya etkin bir biçimde geçmesi,
- 4- Emniyetli olması,

Bir kazan, yanma esnasında en yüksek miktarda ısıyı suya geçirebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Kazanlar değişik görevleri yerine getirebilmek için, çok çeşitli

büyükliklerde ve biçimde yapılır. Günümüzde çoğu kazan, yakıtı daha verimli kullanmak amacı ile birden fazla yakıtı yakacak şekilde tasarlanır.

Kazanların kullanım amacı çok geniştir. Kazanlar ısıtma, güç üretmek ve buhar makinelerini; buhar türbinlerini ve pompaları çalıştırmak amacı ile buhar üretir.

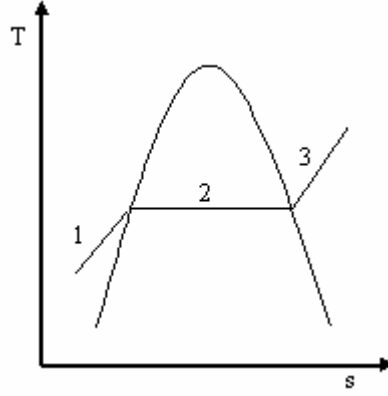
Kazanlarda suyun buharlaştırılması,

1- Sabit basınçta buharlaşma sıcaklığına kadar ısıtılması,

2- Doymuş sıvı fazından doymuş buhar fazına kadar buharlaşma işlemi,

3- Sabit basınçta buharın istenilen sıcaklığa kadar kızdırılması,

şeklinde üç kademede oluşur. Bu kademelerde suya ve buhara verilmesi gereken ısı ve fiziksel özellikler termodinamik tablolardan veya diyagramlardan bulunur (**Genceli, 1985**). Bir birim suyu buhara çevirmek için gerekli olan ısıya, buharlaşma gizli ısı adı verilir. Şekil 2.1, kazan içinde suya ısı geçişinin sıcaklık-entropi diyagramında gösterimidir. Şekil 2.1'e göre, bir numara ile gösterilen kısımda su önce ekonomizörde ısıtılır ve doymuş su çizgisine ulaşır. Ardından iki numara ile gösterilen kısımda su evaporatörde doymuş su kısmından doymuş buhar olana kadar ısıtılır. Üç numara ile gösterilen kısımda ise doymuş su buharı kızgın su buharı olacak şekilde kızdırılır. Ayrıca Şekil 2.1'den hatırlanacağı gibi, buhar basıncı arttıkça yatay çizgi uzunluğu(2 numaralı kısım) kısalır ve basınç artar (**Basu ve diğ, 1999**). Kazanlar, süperkritik ve süperkritik olmayan noktada çalışma basıncına göre tasarlanır (**Kakaç, 1991**). Süperkritik kazanlarda su, buhara dönüşürken, suyun sıcaklığı sürekli bir biçimde artış gösterir. Kritik noktanın altında çalışan kazanlarda ise doymuş su halinden doymuş buhar haline gelene kadar sıcaklık sabit olur (2 numaralı kısım). Kazanın ürettiği buharın sıcaklık ve basıncı arttıkça, kazanın verimi de artar. Bu nedenle süperkritik kazanlar verimi en yüksek olan kazanlardır (**Basu ve diğ, 1999**).



**Şekil 2.1:** Kazanda suya ısı geçişinin T-s diyagramında gösterilişi

Kazanlar genel olarak alev borulu kazan ve su borulu kazan olmak üzere ikiye ayrılır.

Alev borulu kazanlarda yanma sonu ortaya çıkan gazlar bu tip kazanlarda boruların içinden geçtiği için bu tip kazanlara alev borulu kazan ismi verilir (**Woodruff ve diğ., 2005**). Bu tip kazanlar günümüzde büyük güç santrallerinde kullanılmazlar (**El-Wakil, 1984**). Alev borulu kazanlarda kaynama, suyun bulunduğu kısımda gerçekleşir, bu yüzden alev borulu kazanlar sadece doymuş buhar üretimi ile sınırlandırılmıştır (**El-Wakil, 1984**). Bu tip kazanlar düşük kapasitede ve düşük buhar basıncında çalışırlar ve bu nedenle alev borulu kazanlar genel olarak ısıtma sistemlerinde kullanılırlar (**El-Wakil, 1984**).

Su borulu kazanlarda yanma sonu ortaya çıkan gazlar boru demetlerinin arasından geçer. Boru demetlerinin içinden ise su geçer (**Woodruff ve diğ., 2005**).

Su borulu kazanlarda yanma odası su tarafından soğutulur.

Su borulu kazanlarda, alev borulu kazanlara göre daha yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretilir. Basıncın artışına göre suyun buharlaşma gizli ısısı azaldığı için su borulu kazanlar alev borulu kazanlara göre çok daha küçük ısıtma yüzeylidirler.

Sıcak su kazanları sıcak su üretmek amacı ile kullanılırlar. Özellikle ısıtma sistemlerinde en önemli avantajı, çok fazla sayıda binayı ısıtabilmeleridir. Sıcak su kazanları maliyet yönünden buhar üreten kazanlara göre daha avantajlıdır.



Alev borulu kazanlar düşük maliyetleri nedeni ile su borulu kazanlara göre daha fazla tercih edilir. Fakat alev borulu kazanların su borulu kazanlara göre bazı dezavantajları bulunur. Bunlar şu şekildedir:

1- Alev borulu kazanlarda su hacmi su borulu kazanlara göre daha büyüktür ve su sirkülasyonu daha zayıftır. Bu da daha düşük miktarda buhar üretimi sağlar.

2- Alev borulu kazanlarda kapasite, basınç ve buhar sıcaklığı sınırlıdır.

3- Alev borulu kazanlarda, su haznesi ve birleşme yerleri çok yüksek olan yanma odası sıcaklığına maruz kalır ve bu da patlama riskini artırır.

4- Alev borulu kazanlarda boru demetleri çok fazla değişiklik gösteren sıcaklıklara maruz kalır ve bu durum eşit olmayan sıcaklık dağılımı nedeni ile boru demetleri içinde gerilmelere neden olur.

Su borulu kazanlar çok yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretebilecek kapasitededir. Özellikle küçük çapta boru demetlerinin kullanılması ile çok hızlı bir biçimde ısı geçişi sağlanabilir ve çok kısa sürede buhar ihtiyacına cevap verebilir. Buna ek olarak, herhangi bir boruda meydana gelebilecek arıza alev borulu kazanlarda olduğu gibi patlamaya yol açmaz.

Su borulu kazanların maliyetleri alev borulu kazanlardan daha fazla olur.

Su borulu kazanlar herhangi bir ekonomik yakıtı yüksek verim ile yakacak kapasitededirler. Buna karşın alev borulu kazanlar, ısıtma yüzeylerindeki aşınmayı gidermek amacı ile sıvı veya katı yakıtlar yakarlar.

Bütün bu nedenlerden dolayı, özellikle bir kazanı seçerken sadece kazanın maliyeti değil, başka parametrelerin de göz önüne alınması gerekir. Bunlar, kullanılabilirlik, operasyon ve bakım giderleri, yakıt fiyatı, yer alanı gibi faktörlerdir. Belki de bu parametrelerin içinde en önemli olanı yakıt fiyatıdır. Çünkü kazanın ekonomik ömrü sırasında kullandığı yakıt fiyatı, kazanın kendisinden ve bazı yardımcı ekipmanlardan daha fazla olur.

## 2.1. Kazan İçinde Su Sirkülasyonuna Göre Sınıflandırma

Buhar üreten kazanların içinde su sirkülasyonu, doğal sirkülasyon ve zorlanmış sirkülasyon olmak üzere iki şekildedir. Doğal sirkülasyonlu kazanlarda suyun dolaşımı alt ve üst kısımda olan su haznelerinin içindeki suyun yoğunluğuna ve hazneler arasındaki yüksekliğe göre gerçekleşir. Su ısındıkça yoğunluğu azalır ve yoğunluğu azalan su yukarı çıkarken ısınmamış, yoğunluğu fazla olan su ise aşağı doğru hareket eder. Zorlanmış sirkülasyonlu kazanlarda ise suyun dolaşımı bir pompa ile gerçekleşir (Kakaç, 1991).

## 2.2. Kazanların Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırılması

Kullanım alanlarına göre kazan 3 ana gruba ayrılır. Bunlar santral kazanları, endüstriyel kazanlar ve gemi buhar kazanlarıdır.

Santral kazanları elektrik üretmek amacı ile buhar üretirler. Büyük kapasitelidirler. Kazan verimi yüksektir.

Endüstriyel kazanlar ısıtma amacı ile buhar üretirler. Küçük kapasitelidirler. Buhar basınçları düşüktür. Maliyetleri düşüktür. Operasyon giderleri düşüktür.

Gemi buhar kazanları gemilerde güç üretmek için gerekli olan buharı üreten kazanlardır. Hareketli bir araç üzerinde bulduklarından, bu kazanların ağırlıkları ve kapladıkları hacim mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bundan dolayı kazan içindeki su sirkülasyonunun mümkün olduğu kadar hızlı olması gerekir (Genceli, 1985).

## 2.3. Kazanların Basınca Göre Sınıflandırılması

Kazanlar işletme basınçlarına göre düşük ve orta basınçlı kazanlar, yüksek basınçlı kazanlar, süper yüksek basınçlı kazanlar ve süper kritik basınçlı kazanlar olarak sınıflandırılırlar (Kakaç, 1991).

Basıncı 10 MPa değerinin altında buhar üreten kazanlara düşük ve orta basınçlı kazan adı verilir. Genel olarak endüstriyel kazanlar bu tip kazanlardır.

Basıncı 10 ila 14 MPa değerleri arasında buhar üreten kazanlara yüksek basınçlı kazan adı verilir. Santral kazanları bu sınıfa girer.

Basıncı 17 MPa değerinden yüksek buhar üreten kazanlara süper yüksek basınçlı kazan adı verilir.

Basıncı 22.1 MPa değerinin üstünde buhar üreten kazanlara süper kritik basınçlı kazan adı verilir.

#### **2.4. Buhar Kazanlarının Elemanları**

Genel olarak bir kazan ocak, asıl ısıtma yüzeyleri, kızdırıcı, hava ve su ısıtıcılarından meydana gelir.

Ocak yakacakların yakılarak ısı enerjisinin elde edildiği kısımdır.

Bir buhar kazanlarının ocağı aşağıdaki özellikleri içermelidir.

1. Yanma için yeterli hacim olmalıdır.
2. Ocak duvarındaki refrakter ve izolasyon malzemesi ısı iletimi ve sıcaklığa dayanıklılık açısından uygun olmalıdır.
3. Yakıcı elemanların bakımı ve işletmesi kolay olmalıdır.

Asıl ısıtma yüzeyleri sıcak baca gazları ile buharlaşmakta olan suyun temasta olduğu yüzeylerdir.

Buhar kazanlarının asıl ısıtma yüzeylerinden çıkan buhar, doymuş buhar halindedir. Bu doymuş buharı, kızdırıcı adı verilen elemanlar içinde sabit basınçta ısı vererek kızdırmak mümkündür. Kızdırma işlemi buhar çevriminin verimini artırması ve kızgın buharın özellikle buhar türbinlerinde kullanılması halinde türbinin son kademelerinde su zerrecilerinin erozyonunun kalmaması bakımından faydalıdır. Kızdırma sıcaklığı ne kadar arttırılırsa verim o kadar yükselir.

Genellikle bir kızdırıcıdan aşağıdaki görevleri yerine getirmesi istenir:

1. Isıl genleşmeleri karşılayabilecek bir konstrüksiyona sahip olmalıdır.

2. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınçtaki ani değişimlere dayanacak malzemeden yapılmalıdır.
3. İlk yatırım ve işletme masrafları az olmalıdır.
4. Hem baca gazı hem de buhar tarafında basınç kaybı küçük olmalıdır.
5. Mümkün olduğunca küçük hacim kaplamalıdır.

Kazan içinde en yüksek ısı kayıpları baca gazlarından meydana gelir. Bundan dolayı kazanı mümkün olduğunca en yüksek verimde çalıştırabilmek için bu ısı kayıplarının azaltılması gerekir. Bu durum ise hava ve su ısıtıcılarının kazana monte edilmesi ile gerçekleşir.

Teorik olarak kazandan çıkan baca gazlarının sıcaklığını kazana giren havanın sıcaklığına kadar düşürebilmek mümkündür. Fakat bazı ekonomik sınırlamalar sıcaklığın bu kadar çok düşürülmesini önler, çünkü eklenen ekipmanların maliyeti baca gazlarının sıcaklığını çok fazla miktarda düşürerek oluşan tasarrufu dengeler. Buna ek olarak baca gazlarının sıcaklığının, yoğuşmanın meydana geldiği sıcaklığın altına düşürülmesi sonucunda aşınma problemi ortaya çıkar. Bu yüzden ısı değiştirici ekipmanlarının kazana yerleştirilmesi ile oluşan tasarrufun, yatırım ve bakım giderleri ile dengelenmesi gerekir.

Su ısıtıcısı yani diğer bir adı ile ekonomizör, temel olarak bir ısı değiştiricisidir ve kazan ile hava ısıtıcısı arasında bacaya yerleştirilir. Ekonomizörler baca gazlarının atık ısısından yararlanarak kazan besi suyunu ısıtmak ve böylece yakıt ekonomisi sağlamak üzere kullanılırlar. Özellikle yakıt olarak doğal gaz kullanıldığında veya buhar basıncına bağlı olarak baca gazı sıcaklığı yüksekse tavsiye edilir. Ekonomizör performansını etkileyen ana faktörlerden biri duman içinde kükürt oksit oranı, dolayısıyla korozyondur. Yakıt ne kadar temizse ekonomizör çıkışında baca sıcaklığı o kadar düşük tutulabilir. Ekonomizörler, yanma gazları bacadan çıkmadan önce bir miktar ısıyı kapacak şekilde tasarlanırlar. Ekonomizör, boru demetlerinden meydana gelmiştir ve bu boru demetlerinin içinden su geçer. Baca gazları boru demetlerinin arasından geçer. Ekonomizörler, genellikle paralel yada çapraz akışlı olarak dizayn edilir. Paralel akışlı ekonomizörlerde baca gazları ve suyun akış yönü aynı yöndedir. Fakat çapraz akışlı ekonomizörlerde, baca gazları ile suyun akış yönü zıt yöndedir.

Paralel akışlı ekonomizörlerde, çok sıcak olan baca gazları çok soğuk olan baca gazları ile karşılaşır. Çapraz akışlı ekonomizörlerde ise çok sıcak olan baca gazları su ısıtıcısından çıkan ısınmış su ile karşılaşır. Başka bir deyişle, paralel akışlı ekonomizörlere göre tersi bir durum söz konusudur. Çapraz akışlı ısı değiştiricileri paralel akışlı ısı değiştiricilerine göre daha verimlidir. Bunun nedeni, daha fazla miktarda ısı geçişinin sağlanmasıdır.

Hava ısıtıcısı ise ekonomizörden daha sonra gelir ve ekonomizörden çıkan baca gazları atmosfere atılmadan önce hava ısıtıcısından geçerek kazana verilecek havayı ısıtır. Hava ısıtıcılarında da ekonomizörde olduğu gibi duman gazları bir miktar daha soğutulmuş hem daha fazla yakıt ekonomisi, hem de yanma havasının ısıtılması ile ocakta daha iyi bir yanma sağlanır (**Genceli, 1985**).

Hava ısıtıcılarının üstünlükleri şunlardır:

1. Hava ısıtıcısına giren hava sıcaklığı, su ısıtıcısına giren hava sıcaklığından daha düşük olduğu için, duman gazları hava ısıtıcısında daha düşük bir sıcaklığa kadar kolaylıkla soğutulabilir.
2. Hava ısıtıcısındaki basınçlar, su ısıtıcısına göre çok daha azdır.
3. Daha düşük hava fazlalık katsayısı ile tam yanmaya yaklaşıldığından yanma verimi artar.
4. Küçük yüklerde dahi yakıtın tutuşması kolaydır.

Hava ısıtıcısı için, havanın çok düşük sıcaklıklarda girişi veya baca gazlarının çok düşük sıcaklıklarda hava ısıtıcısından çıkışı, ya da ikisinin birden aynı anda gerçekleşmesi, özellikle yakıtın içindeki sülfür yandığı zaman metal üzerinde aşınmaya neden olur. Metal sıcaklığı yaklaşık olarak herhangi verilen noktada hava ve baca gazları sıcaklığının ortalaması kadar olur.

Hava ısıtıcısının sistemde kullanılması verimi yüzde iki ile yüzde on arasında artırır. Bu artış hava ısıtıcısının yerleştirildiği yere ve buhar kapasitesine bağlı olarak değişir. Hava ve su ısıtıcısı sistemin genel verimini arttırsa da, bu artış ek kurulum maliyeti, işletme ve onarım maliyetleri ile dengelenmelidir.

Bir buhar kazanında hava ısıtıcısı ve ekonomizör yakıt tasarrufu ve dolayısıyla ısı verim açısından aynı görevi yapar. Genellikle küçük buhar basınçlarında ve buhar debilerinde ekonomizörler, hava ısıtıcılarına göre daha ekonomiktir. 25 ton/saat buhar debisinden büyük değerlerde hava ısıtıcısı, ekonomizörle rekabet edebilir, büyük işletmelerde ise hem ekonomizör hem de hava ısıtıcısı aynı anda kullanılabilir.

## 2.5. Kazan İçinde Yanma

Yanma, hava ile yakıtın içindeki yanıcı maddelerin kimyasal birleşimi ile gerçekleşir ve ısı açığa çıkmasını sağlar. Yanma hava ile yakıt karışımının yeterli sıcaklığa gelmesi ile gerçekleşir. Yanma esnasında havanın içindeki oksijen yakıtın içindeki karbon, hidrojen, ve diğer ısı açığa çıkaran küçük elementlerle reaksiyona girer **(Woodruff ve diğ, 2005)**.

Yanma; havanın kontrolü, hava ve yakıtın karışması, yanma için gerekli sıcaklık ve yanma için gerekli zaman olarak 4 temel prensipten meydana gelir.

Gerekli olan hava miktarı temel olarak yakıtın cinsine göre değişiklik gösterir. Bunun yanında yanma için kullanılan ekipmanlar, operasyon şartları ve üretici firmanın tavsiyeleri de hava miktarında önemli rol oynar. Çok fazla miktarda havanın kazana beslenmesi sonucunda, yüksek miktarda ısı kaybı ve kazan veriminde düşme meydana gelir. Aynı zamanda havanın bir kısmı yanmadan dışarı atılır. Gereğinden az miktarda havanın kazana girmesi durumunda ise yakıtın bir kısmı yanmamış olur ve bu durumda da kazan verimi düşer. Bu nedenle en iyi oranda hava-yakıt oranının kazana verilmesi mümkün olan en yüksek verimin sağlanabilmesi amacıyla önemlidir **(Woodruff ve diğ, 2005)**.

Yakıtın içindeki bütün yanıcı maddeler ile havanın, yanma meydana gelmeden önce yeterince iyi bir biçimde karışması gerekir. Eğer hava ve yakıt karışımı zayıfsa, yanma odası içinde bazı yerlerde gereğinden fazla miktarda hava, bazı yerlerde ise gereğinden fazla miktarda yakıt olur. Yanma ekipmanları hava ve yakıt arasında mümkün olan en iyi karışımı sağlayacak biçimde imal edilmişlerdir.

Yanıcı maddeler tutuşma sıcaklıklarına eriştikleri zaman, oksidasyon hızlanır ve bu prosese yanma adı verilir. Buradan kolayca anlaşılmaktadır ki yanmayı temin

edebilmek amacı ile, hava ve yakıt karışımının yeterli tutuşma sıcaklığına gelmiş olması gerekir.

Yanma gazları yeterince soğuk olan kazan tüpleri ile temas haline geçtikleri zaman karbon parçacıkları bu metallerin üzerinde kurum oluşturur. Aynı zamanda kazan düşük şartlarda çalıştırıldığı zaman sıcaklıklar düşük olur; bu durumda tamamlanmamış yanma ve aşırı derecede gaz oluşur.

Hava ve yakıtın temini, karışım ve sıcaklık, yanmanın zamanını tayin eden parametrelerdir. Bütün durumlarda tam yanmayı sağlayabilmek için yeterince zamana ihtiyaç vardır. Yanmanın başlayıp bitmesi için yeterince zaman sağlanamazsa fazla miktarda yanmamış yakıt kazandan dışarıya atılır. Bu yüzden bu kayıpların kontrol edilmesi gerekir.

## **2.6. Akışkan Yataklı Kazanlar**

Akışkan yataklı kazanlar, yaklaşık olarak 30 yıldan beri kullanılır. Bu tip kazanlar çok düşük kalitede yakıtları çevresel açıdan kabul edilebilir ölçüde yakma kabiliyetine sahiptirler. Çok geniş yelpazede yakıtları yakma kabiliyeti akışkan yataklı kazandaki türbülanslı karışım sayesinde gerçekleşir.

Akışkan yataklı kazan içinde yanma sıcaklığı sürekli olarak sabittir ve diğer kazanlara göre daha düşük olur. Bu düşük sıcaklık sayesinde çok düşük kalitedeki yakıtların, diğer bir deyişle ısı değeri düşük olan yakıtların, akışkan yataklı kazan içinde yakılması mümkündür. Düşük kalitede yakıtın yakılması sonucunda kazan verimi diğer normal kazanlar gibi çok düşük değerlere düşmez.

Diğer kazanların aksine akışkan yataklı kazanlarda yanma ve ısı açığa çıkışı aynı anda gerçekleşir. Bu özellik ile birlikte çok iyi karışma kabiliyeti bütün yanma odası içinde neredeyse aynı sıcaklık dağılımının elde edilmesini sağlar.

Akışkan yataklı kazanlarda sıcaklığın düşük olması nedeni ile kükürdioksitin kireç taşı ile tutulması mümkündür. Bunun için yanma esnasında kireçtaşının da kazan içine beslenmesi sağlanır. Yanma esnasında kazana sağlanan kireç taşı, kükürdioksit ve oksijen ile birleşir ve katı kalsiyum sülfat ile karbondioksitin ortaya çıkmasını sağlar. Katı kalsiyum sülfat ise sistemden direkt olarak dışarı atılır. Bu teknik ile çok

büyük oranda kükürtdioksitin baca gazları içinden ayrıştırılması sağlanır. Bunun yanında yanma sıcaklığının düşük olması nedeni ile nitrik oksit emisyonu da düşük seviyededir (**Woodruff ve diğ, 2005**). Azot oksit baca gazlarının içinde yer almaktadır ve iki durumdan dolayı meydana gelir. Bunlardan birincisi, yanma havası içindeki azot ve oksijenin birleşerek NO<sub>x</sub> gazını meydana getirmesi ve ikincisi ise yakıtın içindeki azot atomlarının yanma sırasında serbest kalması ve oksijen atomları ile birleşerek NO<sub>x</sub> gazını meydana getirmesi şeklinde olur. Düşük hava fazlalık katsayısı ile yanma ve kademeli burnerlerle yanma sayesinde NO<sub>x</sub> seviyesini kontrol edilebilir seviyede tutulur.

## 2.7. Buhar Kazanı Elemanları

Buhar kazanı üzerinde emniyet ve kontrol amacıyla belirli elemanların bulunması gerekir. Bu elemanlar presostat, manometre, kazan otomatik besisi cihazı, su seviye göstergesi, emniyet vanası ve blöf kontrol vanasıdır. (**Küçükçalı, 2000**).

Presostatlar kazan üzerinde iki adet olmalıdır. Bunlardan birincisi limit presostat olup ayarlanan değerde brülörü durdurur. Diğeri ise basınç ayar presostatı olup, brülör cinsine göre oransal veya ON-OFF kontrollü olabilir. İki kademeli brülör kullanılması halinde üç adet presostat olur. Presostatların ayarı şu şekilde yapılır. Örneğin en çok 8 atü işletme basıncında çalışacak ise, limit presostat 8.5 atü'ye ayarlanmalı, diferans -0.2 olmalıdır. Yani cihaz 8.3–8.5 arasında çalışmalıdır. İşletme presostadı ise 8 atü'ye ayarlanmalı diferansı -0.5 olmalı, yani 7.5–8 atü arasında çalışmalıdır. Bu örnekte emniyet valfi ise 8.8 atü'de açacak şekilde ayarlanmalıdır.

Presostat seçiminde dikkat edilecek çok önemli bir nokta presostat ayar basıncının, presostat çalışma aralığının ortasında bir yerde olmasıdır. Örneğin 8 atü basıncı kontrol edecek bir presostat için 0–10 atü göstergeli bir presostat seçmek yerine 0–15 atü presostat kullanmak daha güvenlidir. Çünkü presostatların orta noktalarında çalışma hassasiyeti daha fazladır. Presostat ile kazan arasında kesinlikle vana bulunmamalıdır (**Küçükçalı, 2000**).

Manometreler de iki adet olmalıdır. Bunlar kazan basıncının okunmasına yararlar. Manometrelerde çalışma basıncı, cihaz aralığının yaklaşık 3/4 'ünde olmalıdır. Örneğin 8 atü için 0 – 10 atü'lük manometre kullanılabilir (**Küçükçalı, 2000**).



Kollektörler, pompa çıkışları gibi yakından okunabilecek yerlere küçük çaplı manometreler; kazan üzeri gibi uzaktan okunacak ve hassas okuma istenilen yerlere büyük çaplı manometreler kullanılır.

Kazan otomatik su besleme cihazı, kazanda ayarlanan su seviyesi azaldıkça, besleme pompalarına kumanda ederek kazana otomatik olarak su basılmasını ve seviyenin sabit tutulmasını temin eder. Kazan üzerindeki en önemli emniyet ve kontrol elemanıdır. Şamandıralı ve sıvı kontaklı olmak üzere iki cinsi bulunur. Şamandıralı cihazlarda bakım yapılmazsa ve beslenen su çamurlu ise, şamandıranın takılması ihtimali vardır. Bu durumda cihaz, kazandaki su seviyesini algılayamaz. Su seviyesinin düşmesine rağmen kazana su basılmaz ve sıra ile önce duman boruları ve sonra külhan su dışında kalır ve tavlınır. Bu sırada aniden su basılırsa kazan patlar. Bu açıdan daldırma tip sıvı kontaklı cihazlar daha emniyetlidir. Seviye kontrol cihazları daha önceden de belirtildiği gibi, emniyet açısından iki veya üç adet olmalıdır. İkinci ve üçüncü cihazlar limitleme görevi yaparlar. Alt seviyeden kumanda alırlar ve normal çalışmada devreye girmezler. Kazana su besleme cihazı olarak şamandıralı tip seçildiğinde bile, emniyet görevi yapan limit seviye kontrol cihazı daldırma tip sıvı kontaklı tip olmalıdır (**Küçükçalı, 2000**).

Sıvı kontaklı cihazların, şamandıralı cihazlara üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

a. Şamandıra takılma riski olmadığından daha emniyetlidirler.

b. Daldırma tip ölçme duyarları kazan içinde bulunduğu gerçekte su seviyesini algırlar. Şamandıralı cihazlar kazan yanında ve kazanla alt ve üst seviyeden iki boruyla ilişkili bir dik kollektöre bağlanırlar. Kollektörde su seviyesi kazan çalışmazken birleşik kaplar prensibine göre kazandaki su seviyesi ile aynıdır. Ancak kazan çalışmaya başladığında, buhar çıkışı sürecinde kazanda su kabarır. Kollektörde ise daha ağır su bulunduğundan seviye düşüktür. Öte yandan su seviyesi kazan içinde dalgalanırken, kollektörde bu takip edilemez. Sonuç olarak kazan büyüklüğüne ve basıncına bağlı olarak ortaya çıkan bu fark 60–70 mm değerlerine kadar ulaşabilir. Kollektöre bağlanan cihazlar gerçekte su seviyesini algılayamazlar. Daldırma tip seviye propları kollektöre bağlanabilecekleri gibi doğrudan kazana da daldırılabilirler. Limit seviye proplarının doğrudan kazana daldırılması tavsiye edilir.

c. Kendi kendini test eden seviye duyargaları, sistemin her gün test edilme zorunluluğunu ortadan kaldırırlar. Bakıma ihtiyaç duymazlar.

Şamandıralı otomatik su seviye kontrol cihazları genellikle 3 kontaklıdır. Bu kontaklar doğrudan pompaya ON/OFF olarak kumanda ederler. 1. kontak pompa çalıştırma, 2. kontak pompa durdurma, 3. kontak minimum su seviyesinde brülörü durdurma ve alarm görevi üstlenir. 5 kontaklı cihazlarda ise üst seviye alarmı ve ikinci alt limit ilave edilir. Şamandıralı cihaz 3 kontaklı olmalı ve bir daldırma tip limit kontrol cihazı ile kullanılmalıdır. Bu cihazlar kazan yan tarafında dikey olarak kollektöre bağlanır. Kollektöre aynı zamanda iki adet su seviye göstergesi takılır.

Modern kazanlarda sıvı kontaklı cihazlar tercih edilir. Bunlarda genellikle iletkenlik algılayıcı çubuklar kullanılır. Gözetim altında işletilen kazanlarda basit tipler kullanılır. Gözetimsiz işletmelerde cihaz sayısı üçtür ve bu cihazların kontrol ve emniyet yeteneği yüksek olmalıdır. Su seviye kontrolü, pompanın ON/OFF çalıştırılmasıyla olabileceği gibi, pompa sürekli çalışırken bir motorlu vanaya kumanda edilmek suretiyle oransal da olabilir. Oransal kontrol, doğrudan frekans kontrollü kazan pompasıyla da yapılabilir. Bu durumda enerji tasarrufu mümkündür. Ancak voltajın düşük olduğu tesislerde frekans kontrollü pompalar daha fazla arıza yapabilir. Kesintili çalışmada dalgalı, kararsız karakteristik nedeniyle kazan verimi ve ömrü azalır. ON/OFF kontrolün, avantajları şunlardır:

1. Basit ve kolay uygulanabilir.
2. Ucuzdur.
3. Küçük kazanlara veya yedek kazanlara uygundur.

Dezavantajları:

1. Her kazan için ayrı besli pompası gerekir.
2. Pompa sık devreye girdiğinden ömrü azalır.
3. Kazanda basınç ve buhar kapasitesi dalgalıdır.
4. Buharda kuruluk derecesi düşüktür.

Modern kazanlarda, gelişen teknolojiye paralel olarak seviye kontrolü ve kazan suyunun beslenmesi hassas ve emniyetli bir şekilde duyarga sistemleri ile gerçekleştirilir.

Kazanda, buhar üretimi esnasında kesin bir su seviyesinin okunması, klasik su seviye göstergeleri ile mümkün değildir.

Buhar üretildiği anda su seviyesi buhar-su karışımı baloncuklardan oluşur ve su seviyesinin hareket halinde olması nedeniyle kesin su seviyesi algılanamaz. Kazan dışından izlenen su seviyesi kazan içerisindeki gerçek su seviyesinden daha düşük olarak okunur. Bunun nedeni ise kazan dışındaki su seviye göstergesindeki suyun yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır.

Gerçek su seviyesi ile dış göstergelerden okunan su seviyesi arasındaki farka etki eden faktörler:

1. Kazan buhar kapasitesi
2. Kazan dış seviye göstergesinin kazana göre yüksekliği
3. Kazan suyunun kimyasal özelliği
4. Kazan gövdesinin büyüklüğü
5. Duyarga muhafaza borusunun su seviyesinin altındaki uzunluğu

Gerek besi pompasının çalıştırılması, gerekse düşük ve yüksek su seviyelerinin kontrolünün hassas bir şekilde yapılabilmesi ancak kazan içerisine daldırılarak görev yapan seviye kontrol duyargaları ile mümkündür (**Ünlü, 1997**).

Bu tür sistemlerin avantajları:

1. Ölçme duyargaları, kazan içerisinde bulunmaları nedeniyle gerçek seviyeyi okurlar.
2. Kendi kendini test eden seviye duyargaları, sistemin her gün test edilme zorunluluğunu ortadan kaldırır.

3. Bu duyargaların sistemleri, hareket eden elemanlardan oluşmadığı için güvenlidir ve bakıma ihtiyaç duymazlar.

Emniyet cihazları içinde en önemlisi emniyet vanalarıdır. Emniyet vanaları ağırlıklı ve yaylı cinsten olabilir. Kazan üzerinde iki adet bulunurlar. Bunlardan biri yaylı, diğeri ağırlıklı tipte olabilir. Günümüzde genellikle yaylı tip emniyet vanaları kullanılır. Emniyet vanaları açtıklarında kazandaki basınç yükselmeyecek şekilde boyutlandırılırlar. Emniyet vanaları çaplarına göre isimlendirilir. Emniyet valfleri, maksimum çalışma basıncının %6 üzerine çıkılmadan, kazan tam kapasitede iken buharı dışarı atabilecek ölçüde olmalıdır. Emniyet valfleri çalışma basıncının %10 üzerinde bir değere ayarlanmalıdır.

Kazan içindeki tuz konsantrasyonunu ayarlamak için üst blöf yapılıır. Yani yüksek oranda tuz içeren kazan içindeki su dışarı atılarak yerine çok daha az tuz içeren taze su alınır. Böylece kazandaki tuz konsantrasyonu düşürülür. Eğer üst blöf yapılmazsa, su yüzeyinde köpüklenme olur ve buharla birlikte yüksek oranda tuz içeren su sürüklenir. Bu tuzlu su kontrol cihazlarının arızalanmasına, eşanjör yüzeyinde birikim oluşmasına, buhar kapanlarının tıkanmasına ve boruda ve cihazlarda korozyona neden olur. Blöf yapmanın bir amacı da buhar kazanı içindeki suyun mineral değişikliğini azaltarak elektro korozyon ile metallerin erimesini önlemektir. Blöf miktarı, besi suyunun tuz içeriğine, geri döndürülen kondens miktarına ve kazan buhar kapasitesine bağlıdır.

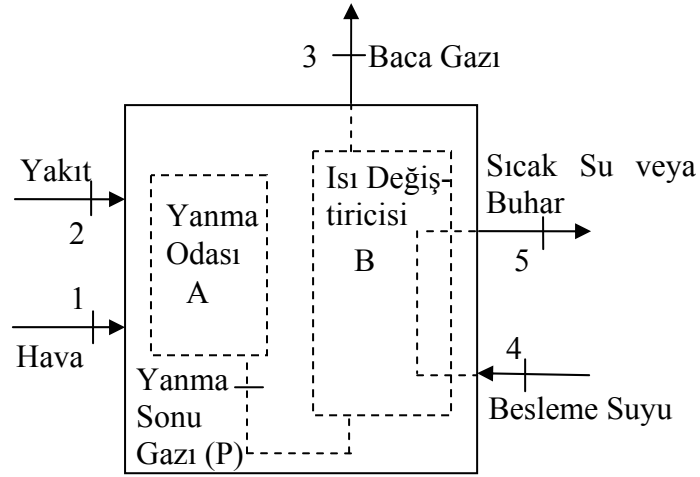
Blöf işlemi elle yapılabileceği gibi, gözetimsiz çalışan kazanlarda otomatik olmak zorundadır. Bunun için, kazandaki suyun elektrik iletkenliği değerinden uyarı alınır. Bir iletkenlik probu, bir kontrolör ve bir elektrik veya hidrolik olarak aktive edilen motorlu vanadan oluşan sistem otomatik olarak blöf yapar (**Küçükçalı, 2000**).

Kazanda biriken çamur, tortu vs. yabancı maddeleri dışarı atmak için dip blöf vanasından dışarı su atılır. Bu işlem elle yapılabileceği gibi, gözetimsiz çalışan kazanlarda otomatik olarak yapılmalıdır. Otomatik dip blöf vanası belirli aralıklarla açılarak dışarı su atar. Otomatik dip blöf vanası, hava ile harekete geçen bir pnömatik küresel vanadır.

### 3. TERMODİNAMİK ÇÖZÜMLEME VE EKSERJİ ÇÖZÜMLEMESİ

#### 3.1. Termodinamik Çözümleme

Bu çalışmada incelenen sistem Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Kazan sürekli akışlı açık bir sistem olarak incelenmiştir.



Şekil 3.1: Kazan için kontrol hacmi

Yanma odasında açığa çıkan ısının %99’ünün suya geçtiği varsayılmıştır. Sürekli akışlı açık bir sistemde, kütle korunumu ve enerjinin korunumu yasaları aşağıda verilmiştir:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (3.1)$$

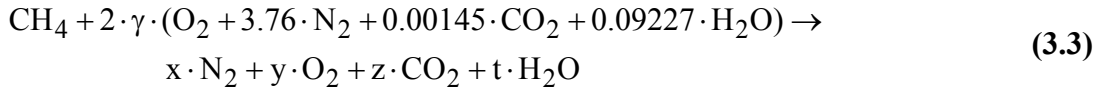
$$\dot{Q}_{kh} - \dot{W}_{kh} = \sum \dot{m}_ç \cdot h_ç - \sum \dot{m}_g \cdot h_g \quad (3.2)$$

olmaktadır. Termodinamik hesaplar farklı yakıt türleri için yapılmıştır. Bu hesaplarda önce yanma denklemi oluşturulmuş ve buna göre kazanın içindeki en yüksek yanma sıcaklığı, kütle debisi bulunmuş, giren ve çıkan akışların ekserji

hesabı yapılmıştır. Kazana giren havanın mol bileşimi %77.48 N<sub>2</sub>, %20.59 O<sub>2</sub>, %0.03 CO<sub>2</sub>, %1.9 H<sub>2</sub>O alınmıştır. Aşağıda önce doğalgaz, sonra kömür yanması için yapılan hesaplar açıklanmıştır.

### 3.2. Doğalgaz Yanması için Termodinamik Çözümleme

Doğalgazın bileşimi değişmekle birlikte genel olarak %87-96 arasında metandan, %1.8-5.1 arasında etandan, %0.1-1.5 arasında propandan, %0.01-0.3 arasında izo-bütandan, %0.01-0.3 arasında normal bütandan, %0-0.14 arasında izo-pentandan, %0-0.04 arasında normal pentandan, %1.3-5.6 arasında azottan, %0.1-1 arasında karbondioksitten, %0.01-0.1 arasında oksijenden, %0-0.02 arasında hidrojenenden oluştuğu bilinmektedir. Bu çalışmada doğalgaz metana (CH<sub>4</sub>) eşdeğer sayılmıştır. Bu durumda yanma denklemi aşağıda gösterildiği gibi olur:



$\gamma$  burada hava fazlalık katsayısını göstermektedir. Hesaplamalar farklı hava fazlalık katsayıları için yapılacağından x,y,z,t değerleri  $\gamma$  değerine bağlı olarak verilmiştir.

Buna göre,

$$x = 2 \cdot \gamma \cdot 3.76 \quad (3.4)$$

$$z = 1 + 2 \cdot \gamma \cdot 0.00145 \quad (3.5)$$

$$t = 2 + 2 \cdot \gamma \cdot 0.09227 \quad (3.6)$$

$$y = 2 \cdot \gamma + 2 \cdot \gamma \cdot 0.00145 + \gamma \cdot 0.09227 - z - \frac{t}{2} \quad (3.7)$$

olmaktadır.

Yanma odası göz önüne alınırsa, yanma odasında en yüksek sıcaklık, başka bir deyişle alev sıcaklığı bulunmalıdır. En yüksek sıcaklığın bulunması baca gazının,

suyun ve yakıtın kütleli debilerinin bulunması için gereklidir. Yanma odasından çevreye bir miktar ısı kaybı olmaktadır. Bu çalışmada ısı kaybı yakıtın alt ısı değerinin %1'i civarında alınmıştır. Yanma denkleminin yardımı ile kazan içindeki en yüksek sıcaklık bulunur. Kazan içindeki en yüksek sıcaklığı bulmak için termodinamiğin birinci yasası sürekli akışlı açık sistem modellenmesine göre yazılmıştır. Yanma odası (Şekil 3-1'de, altsistem A) sürekli akışlı açık bir sistem olarak alınır ve termodinamiğin birinci yasası uygulanırsa,

$$Q = \sum H_{\dot{c}} - \sum H_{\dot{g}} \quad (3.8)$$

bağıntısı elde edilir. Burada kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ve sürtünme göz ardı edilmiştir.

Yakıtın alt ısı değeri doğalgaz için LHV= 802361 kJ/kmol olarak alınmıştır. Yakıt, hava ve baca gazları için entalpi hesaplanırken **Knache ve diğ., (1991)** tarafından verilen tablo ve bağıntılardan yararlanılmıştır. Buna göre entalpiyi hesaplamak için,

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + a \cdot y + \frac{b}{2} \cdot y^2 - c \cdot y^{-1} + \frac{d}{3} \cdot y^3 \right] \quad (3.9)$$

$$y = \frac{T}{1000} \quad (3.10)$$

bağıntıları kullanılır ve sıcaklık K biriminde ifade edilir. Yukarıdaki bağıntılarda yer alan  $H^+$ , a, b, c, d değerleri aşağıda verilen tablodan alınmıştır.

**Tablo 3.1:** Doğalgaz yanması için gerekli olan  $H^+$ , a, b, c, d sabitleri (Knache ve diğ.)

|           | $H^+$    | a      | b      | c      | d       |
|-----------|----------|--------|--------|--------|---------|
| $N_2(g)$  | -9.982   | 30.418 | 2.544  | -0.238 | 0       |
| $O_2(g)$  | -9.589   | 29.154 | 6.477  | -0.184 | -1.017  |
| $CO_2(g)$ | -413.886 | 51.128 | 4.368  | -1.469 | 0       |
| $H_2O(g)$ | -253.871 | 34.376 | 7.841  | -0.423 | 0       |
| $CH_4(g)$ | -81.242  | 11.933 | 77.647 | 0.142  | -18.414 |

Yakıt ve hava sisteme 298 K'de girmektedir. Sıcaklıklar bilindiği için yakıtın ve giriş havasının entalpisi kolaylıkla bulunur.

Yakıtın 1 kmol'ü için, yanma odasından dış çevreye ısı kaybının, yakıtın alt ısıl değerinin yüzde biri olduğu varsayılmıştır. Bu durumda 3.8 numaralı bağıntıda,

$$Q = -LHV \cdot 0.01 \cdot n_{CH_4} \quad (3.11)$$

olur. Giren akımların toplam entalpisi,

$$\sum H_g = n_{N_2} \cdot \bar{h}_{N_2} + n_{O_2} \cdot \bar{h}_{O_2} + n_{CO_2} \cdot \bar{h}_{CO_2} + n_{H_2O} \cdot \bar{h}_{H_2O} + n_{CH_4} \cdot \bar{h}_{CH_4} \quad (3.12)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Eşitlikteki n değerleri, yanma denklemindeki mol miktarlarını gösterir. Benzer biçimde çıkan akımların toplam entalpisi,

$$\sum H_c = n_{N_2} \cdot \bar{h}_{N_2} + n_{O_2} \cdot \bar{h}_{O_2} + n_{CO_2} \cdot \bar{h}_{CO_2} + n_{H_2O} \cdot \bar{h}_{H_2O} \quad (3.13)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Böylece 3.8 numaralı denklemi kullanarak yanma odasında gazların eriştiği sıcaklık iterasyonla hesaplanabilir.

$T_{maks}$  değerini bulmak için bir program yazılmıştır. Hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte kazan içindeki en yüksek sıcaklık düşer.

1 kmol yakıt için baca gazlarının kütle debisi hava fazlalık katsayısı verildiği için hesaplanabilir. Baca gazlarının kazandan çıkış sıcaklığı 423 K alınmıştır.

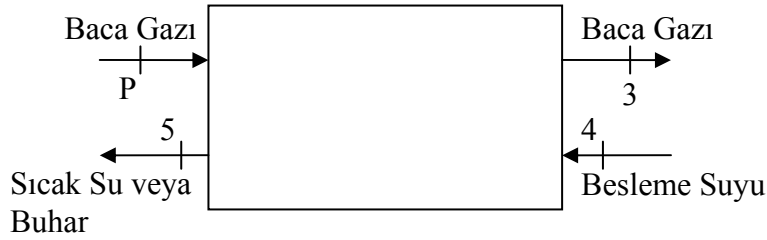
Buna göre kazan içindeki en yüksek sıcaklık ile baca gazı çıkış sıcaklığı arasındaki entalpi farkı bulunur. Entalpi farkı 1 kmol yakıt yandığı zaman suya geçen ısıyı gösterir. Burada entalpi farkının birimi kJ/kmol olmaktadır. Diğer bir deyişle, baca gazlarını meydana getiren  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  için mol miktarları değil de 1 kmol yakıt için mol oranları alınarak baca gazlarının entalpisi bulunmuştur. Kazan içindeki gazın belirli bir sıcaklıktaki entalpisi, o sıcaklıkta baca gazı bileşenlerinin entalpilerinin, bileşenlerin mol oranları ile çarpılıp birbiri ile toplanması ile bulunur. Bu çalışmada hesaplar 1000 kW kazan ısı gücü temel alınarak yapılmıştır. Buna göre en yüksek yanma sıcaklığı ile baca gazı çıkış sıcaklığı için bulunmuş olan entalpi farkı ( $h_{dif}$ ) baca gazı kütle debisi ile çarpılıp baca gazı mol kütlesine bölünürse suya geçen ısı bulunmuş olur. Buna göre,



$$\frac{\bar{h}_{\text{dif}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) \cdot \dot{m}_{\text{cp}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{sn}} \right)}{M_{\text{cp}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)} = 1000 \text{ kW} \quad (3.14)$$

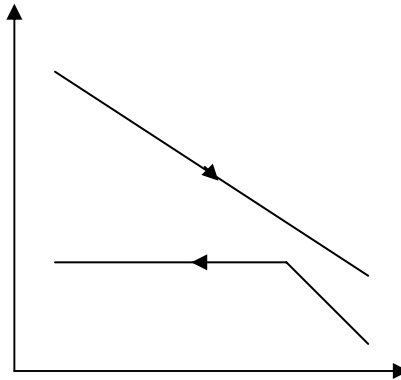
bağıntısı kullanılarak baca gazı kütle debisi bulunur.  $M_{\text{cp}}$  baca gazlarının mol kütlelerini ifade eder ve değeri baca gazlarının bileşenlerinin mol oranları ile bileşenlerin mol kütlelerinin çarpımının toplanması ile bulunur. Yukarıdaki bağıntıda sadece  $\dot{m}_{\text{cp}}$  (baca gazı kütle debisi) değeri bilinmemektedir.

Suyun kütle debisi özellikle ekserji ve maliyet hesaplarında kullanılacağı için değişik hava fazlalık katsayısı ve doymuş buhar ya da sıcak su çıkışı halleri için bulunmuştur. Daha önceden de belirtildiği gibi kazan içindeki en yüksek sıcaklık ile baca gazı çıkış sıcaklığı arasındaki entalpi farkı suya geçmiştir. Buradan suyun çıkış hali verildiğinden, su debisi hesaplanabilir.



**Şekil 3.2:** Kazan içinde suya ısı geçisi

Kazan içinde su akışı ya paralel akış, ya da çapraz akış şeklinde olur. Bu çalışmada da kazan içindeki akış çapraz akışlı olarak alınmıştır. Çapraz akış durumunda akış şekli aşağıdaki gibidir.



**Şekil 3.3:** Kazan içinde sıcaklık dağılımı

Buna göre “Pinch teorisi” uygulanarak suyun kütle debisi bulunur. Çok küçük pinch sıcaklığı farkı daha düşük sıcaklık farkına ve bu sayede daha düşük tersinmezliğin oluşmasına neden olur.

Yakıtın kütle debisi en yüksek yanma sıcaklığı ile baca gazı çıkış sıcaklığı için entalpi farkı yardımı ile bulunur. Baca gazları için en yüksek ve en düşük sıcaklık farkına göre entalpi farkı  $H_{dif}$  (kJ) biriminde bulunur ve bu sayede 1 kmol yakıtı yakınca suya geçen ısı kJ biriminde bulunmuş olur. Başka bir deyişle, saniyede 1 kmol yakıt ile  $H_{dif}$  (kW) ısı suya geçmektedir. Burada incelenen kazanın gücü 1000 kW olduğu için doğru orantı ile kazan içinde yakıtın molar debisi bulunur. Artık yapılması gereken, molar debiyi kütle debisine çevirmektir. O da yakıtın molar debisi ( $\dot{n}_f$ ), yakıtın mol kütlesi ile çarpılarak bulunur.

$$\dot{m}_f = \dot{n}_f \cdot M_f \quad (3.15)$$

Yakıtın mol kütlesi olarak  $M_f = 16$  kg/kmol doğalgazın mol kütlesi alınmıştır.

### 3.3. Kömürün Yanması İçin Termodinamik Çözümleme

Bu kısımda ise kömürün yanması durumu göz önüne alınarak önceki kısımlarda doğalgaz için yapılmış olan işlemler kömür yanması için tekrarlanmıştır. Yakıt olarak kömür yakan kazan içinde doğalgaz yanması için yazılan yanma denklemi gibi, kömürün yanması durumu için yeni yanma denkleminin, kömürün bileşenleri göz önüne alınarak yazılması gerekir. Kömürün yanması durumu için yanma denklemini yazabilmek amacı ile ilk olarak yakıtın genel formülünün bulunması gerekir. Fakat kömürün bileşenleri % cinsinden ağırlık olarak verildiği için önce kömürün içindeki bileşenlerin mol oranları bulunmalıdır (El-Wakil, 1984).

İlk olarak % cinsinden kömürü meydana getiren her bir bileşenin kütle oranı %a C, %b H, %c O, %d N, %e S olacak biçimde verilsin. Önceden bilinen yakıt içindeki bileşenlerin kütle oranları her bir bileşenin mol kütlesine bölüldüğü zaman,

$$n'_C = \frac{a}{12 \cdot 100}, n'_H = \frac{b}{1 \cdot 100}, n'_O = \frac{c}{16 \cdot 100}, n'_N = \frac{d}{14 \cdot 100}, n'_S = \frac{e}{32 \cdot 100} \quad (3.16)$$

biçiminde 1 kg kömür için kömürü oluşturan bileşenlerin mol sayıları bulunmuş olur.

Bulunan mol sayıları birbiri ile toplanırsa ve bu toplam herbir mol sayısına bölünürse normalizasyon yapılmış olur ve 1 kmol yakıt içinde kömürü meydana getiren bileşenlerin mol sayıları bulunmuş olur (**El Wakil, 1984**). Yani doğru orantı yapılmış olmaktadır. Bütün bileşenler için bu hesaplama aşağıda gösterilmiştir.

$$n'_{\text{top}} = n'_C + n'_H + n'_O + n'_N + n'_S \quad (3.17)$$

$$n_C = \frac{n'_C}{n'_{\text{top}}}, n_H = \frac{n'_H}{n'_{\text{top}}}, n_O = \frac{n'_O}{n'_{\text{top}}}, n_N = \frac{n'_N}{n'_{\text{top}}}, n_S = \frac{n'_S}{n'_{\text{top}}} \quad (3.18)$$

Artık bulunmuş olan mol sayılarına göre kömür için yanma denklemi yazılabilir. Yazılan yanma denklemi aslında doğalgaz için yazılan denklemin benzeridir, sadece katsayılar değişecektir ve baca gazı olarak ayrıca SO<sub>2</sub> çıkacaktır.

$$\left( C_{n_C} + H_{n_H} + O_{n_O} + N_{n_N} + S_{n_S} \right) + \gamma \cdot O_{\text{min}} \cdot \begin{pmatrix} O_2 + 3.76 \cdot N_2 \\ +0.00145 \cdot CO_2 \\ +0.09227 \cdot H_2O \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$\rightarrow x \cdot N_2 + y \cdot O_2 + z \cdot CO_2 + t \cdot H_2O + d \cdot SO_2$$

Bu denklemde O<sub>min</sub> değeri aşağıdaki gibi bulunur (**Bejan ve diğ, 1996; El-Wakil, 1984; Borat, 1982**).

$$O_{\text{min}} = n_C + \frac{n_H}{4} + n_S - 0.5 \cdot n_O \quad (3.20)$$

Aslında doğalgaz yanması içinde aynı işlem ile O<sub>min</sub> değeri bulunur. Doğalgazın yanma denkleminde havanın başında bulunan 2 katsayısı bu şekilde ortaya çıkar. Fakat bütün termodinamik kitaplarında yanma denklemini yazarken doğalgaz için direkt olarak 2 katsayısı havanın başında alındığı için burada da 2 alınmıştır. Nasıl bulunduğunu göstermeye gerek duyulmamıştır.

Yanma denklemine göre ürünlerin mol sayıları artık bulunabilir.

$$x = \frac{n_N}{2} + 3.76 \cdot \gamma \cdot O_{\min} \quad (3.21)$$

$$z = n_C + \gamma \cdot O_{\min} \cdot 0.00145 \quad (3.22)$$

$$t = \frac{n_H}{2} + \gamma \cdot O_{\min} \cdot 0.09227 \quad (3.23)$$

$$d = n_S \quad (3.24)$$

$$y = \frac{n_O}{2} + \gamma \cdot O_{\min} + \gamma \cdot O_{\min} \cdot 0.00145 + \frac{\gamma \cdot O_{\min} \cdot 0.09227}{2} - z - d - \frac{t}{2} \quad (3.25)$$

$\gamma$  katsayısı burada da hava fazlalık katsayısını ifade eder. Doğalgazın yanma denkleminde olduğu gibi farklı hava fazlalık katsayılarına göre duyarlı olacak şekilde denklem eşitlenmiştir.

Kazan içinde kömür yanması içinde en yüksek sıcaklığın bulunması aslında doğalgaz için yapılan yöntemin aynısıdır. Doğalgaz için yakıtın alt ısı değeri kitaplardan alınır. Fakat kömürün içindeki bileşenlerin % oranları değiştikçe kömürün alt ısı değeri de değişeceği için, değişik yüzde oranları için alt ısı değerinin bulunması gerekir. Yakıtın alt ısı değeri de giren yakıt, hava ve çıkan baca gazlarının sıcaklığı 298 K'de alınarak, çıkan ürünler ile giren ürünler arasında entalpi farkı yazılarak bulunur (El-Wakil, 1984). Entalpiyi hesaplamak için yine Knache ve diğ., (1991) tarafından verilen bağıntılar kullanılmıştır. Bu bağıntılar yukarıda da verildiği gibi,

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + a \cdot y + \frac{b}{2} \cdot y^2 - c \cdot y^{-1} + \frac{d}{3} \cdot y^3 \right] \quad (3.26)$$

$$y = \frac{T}{1000} \quad (3.27)$$

bağıntılarıdır. Hesaplamalarda aşağıdaki tablodaki değerler kullanılmıştır.

**Tablo 3.2:** Kömürün yanması için gerekli olan  $H^+$ , a, b, c, d sabitleri

|           | $H^+$    | a      | b     | c      | d      |
|-----------|----------|--------|-------|--------|--------|
| $N_2(g)$  | -9.982   | 30.418 | 2.544 | -0.238 | 0      |
| $O_2(g)$  | -9.589   | 29.154 | 6.477 | -0.184 | -1.017 |
| $CO_2(g)$ | -413.886 | 51.128 | 4.368 | -1.469 | 0      |
| $H_2O(g)$ | -253.871 | 34.376 | 7.841 | -0.423 | 0      |
| $SO_2(g)$ | -315.422 | 49.936 | 4.766 | -1.046 | 0      |

Yakıtın entalpisi 298 K için 0 alınmıştır (**El-Wakil, 1984**).

$$LHV = H_c(298K) - H_g(298K) \quad (3.28)$$

Yakıt için alt ısıl değeri bulurken hava fazlalık katsayısı  $\gamma$  değeri 1 alınmalıdır (**El-Wakil, 1984**). Fakat hava fazlalık katsayısının 1 alınması sadece tam yanma durumuna göre yakıtın alt ısıl değerini bulmak içindir. Diğer hesaplamaları yaparken hava fazlalık katsayısının istenilen değerleri dikkate alınmalıdır ve buna göre yanma denklemi tekrardan eşitlenerek hesaplamalar yapılmalıdır.

Yukarıda alt ısıl değeri bulmak için verilen (3.28) numaralı bağıntı yardımı ile, yakıtın alt ısıl değeri kJ/kmol değeri için bulunur. Burada yanma ürünleri ve hava için  $\bar{h}$  değeri her bir bileşen için 298 K için bulunup, mol katsayıları ile çarpılıp, birbiriyle toplanması ile bulunur.

Bu işlem burada en basit şekilde doğalgaz için gösterilebilir. Doğalgaz için yanma denklemi ve yanma denklemine giren ve çıkanların entalpi değeri basitçe aşağıdaki gibi yazılırsa,



$$\bar{h}_{CH_4}(298K) = -74872 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{CO_2}(298K) = -393521 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{H_2O}(298k) = -241856 \text{ kJ/kmol}$$

olmuş olur. Buradan alt ısıl değeri bulmak için verilen bağıntıya göre hesap yapılırsa,

$$LHV = 2 * (-241856) + (-393521) - (-74872) \quad (3.30)$$

$$\text{LHV} = -802361 \text{ kJ/kmol}$$

bulunmuş olur. Bu değerde kitaplardan alınan değer aynısıdır. Dikkat edilirse alt ısı değeri bulmak için denklem, hava fazlalık katsayısı 1 olacak şekilde eşitlenmiştir.

Yakıtın bir kmol'ü için yanma odasından dış çevreye ısı kaybının, yakıtın alt ısı değerinin yüzde biri varsayılmıştır. Artık kazan içinde en yüksek yanma sıcaklığının bulunması amacı ile sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci yasası uygulanır.

$$Q = \sum H_{\text{ç}} - \sum H_{\text{g}} \quad (3.31)$$

bağıntısı kömürün yanması için uygulanmış olur.

$H_{\text{g}}$  ve  $H_{\text{ç}}$  değerleri tabloda verilen değere göre bulunur. Giriş için 298 K alındığı için giristeki entalpi değeri sabit olmaktadır. 3.31 numaralı denklemi kullanarak yanma odasında gazların eriştiği sıcaklık iterasyonla bulunabilir. Doğalgaz yakan kazan içindeki en yüksek sıcaklık hava fazlalık katsayısı ile değişiyordu. Kömür yakan kazan için ise hava fazlalık katsayısının yanı sıra kömürün bileşenleri değiştikçe de kazan içindeki en yüksek sıcaklık değişir.

1 kmol yakıt için baca gazlarının kütle debisi hava fazlalık katsayısı verildiği için hesaplanabilir. Kazandan baca gazları çıkış sıcaklığı olarak 423 K alınmıştır.

Buna göre kazan içindeki en yüksek sıcaklık ile baca gazı çıkış sıcaklığı arasındaki entalpi farkı bulunur. Bulunan entalpi farkı 1 kmol yakıt yandığı zaman suya geçen ısıyı gösterir. Entalpi farkı kJ/kmol biriminde bulunur. Başka bir deyişle, baca gazlarını meydana getiren  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{SO}_2$  için mol sayıları değil de mol oranları alınarak baca gazlarının entalpisi bulunur. Baca gazının belirli bir sıcaklıktaki entalpisini bulmak için o sıcaklıkta baca gazı bileşenlerinin entalpileri bileşenlerin mol oranları ile çarpılıp birbiri ile toplanması ile bulunur. Bu çalışmada hesaplar 1000 kW kazan ısı gücü temel alınarak yapılmıştır. Buna göre önceden bulunmuş en yüksek yanma sıcaklığı ile baca gazı çıkış sıcaklığı arasındaki entalpi farkı ( $h_{\text{dif}}$ ) baca gazı kütle debisi ile çarpılıp baca gazı mol kütlelerine ( $M_{\text{cp}}$ ) bölünürse

suya geçen ısı miktarı bulunmuş olur. Kullanılan bağıntı yukarıda doğalgaz için verilen bağıntının aynısıdır. Buna göre,

$$\frac{\bar{h}_{\text{dif}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) \cdot \dot{m}_{\text{cp}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{sn}} \right)}{M_{\text{cp}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)} = 1000 \text{ kW} \quad (3.32)$$

bağıntısı kullanılarak baca gazı kütle debisi kolaylıkla bulunur. Burada  $M_{\text{cp}}$  değeri baca gazları için mol kütlelerini ifade ettiği için mol kütleleri değerinin hesaplanması gerekir. Kömürü oluşturan bileşenlerin oranları değiştikçe baca gazı bileşenlerinin mol sayıları da değişir. Baca gazlarının mol kütleleri baca gazlarını meydana getiren bileşenlerin mol kütleleri ile molar oranlarının birbiri ile çarpılıp ardından toplanması ile bulunur. Ardından 3.32 nolu bağıntı ile baca gazları kütle debisi hesaplanır.

Kömür yakan kazanda da suyun kütle debisi doğalgaz yakan kazandaki yöntem uygulanarak hesaplanır. Suyun kütle debisi değişik hava fazlalık katsayısı ve doymuş buhar ya da sıcak su çıkışı halleri için bulunmuştur. Kazan içindeki en yüksek sıcaklık ile baca gazı çıkış sıcaklığı arasındaki entalpi farkı suya geçmiştir.

Buna göre “Pinch teorisi” uygulanarak suyun kütle debisi bulunur. Çok küçük pinch sıcaklığı farkı daha düşük sıcaklık farkına ve bu sayede daha düşük tersinmezliğin oluşmasına neden olur.

Yakıtın kütle debisi doğalgaz yanması durumu için uygulanan yöntem ile bulunur. Fakat yakıtın mol kütlelerinin bulunması gerekir. Yakıtın mol kütleleri de ( $M_f$ ), yakıtı oluşturan bileşenlerin oranları değiştikçe değişiklik göstereceği için hesaplanmalıdır. Yakıtın mol kütleleri yanma denklemini eşitlemek amacı ile normalizasyon sonucu bulunmuş olan yakıt içindeki bileşenlerin mol sayılarının her bir bileşenin mol kütleleri ile çarpılıp, birbiri ile toplanması ile bulunur.

Yakıtın kütle debisi doğalgaz yakmalı kazanda olduğu gibi kazan içindeki en yüksek yanma sıcaklığı ile baca gazı çıkış sıcaklığı için entalpi farkı yardımı ile bulunur. Baca gazları için en yüksek ve en düşük sıcaklık farkına göre entalpi farkı  $H_{\text{dif}}$  (kJ) biriminde bulunur ve bu sayede 1 kmol yakıtı yakınca suya geçen ısı kJ biriminde

bulunmuş olur. Başka bir deyişle saniyede 1 kmol yakıt ile  $H_{dif}$  (kW) ısı suya geçmektedir. Burada incelenen kazanın gücü, 1000 kW olduğu için doğru orantı ile kazan içinde yakıtın molar debisi bulunur. Artık yapılması gereken, molar debiyi kütle debisine çevirmektir. O da yakıtın molar debisi ( $\dot{n}_f$ ) yakıtın mol kütlesi ile çarpılarak bulunur. Yine doğalgaz yakmalı kazanda verildiği gibi,

$$\dot{m}_f = \dot{n}_f \cdot M_f \quad (3.33)$$

bağıntısı ile yakıtın kütle debisi bulunur.

### 3.4. Ekserji Değerlerinin Hesaplanması

Bu kısımda kazana giren ve çıkan tüm akımlar için ekserji çözümlenmesi yapılmıştır. Ekserji bir sistemin çevre ile denge haline gelirken yapabileceği en büyük iştir. Bu hal değişimi sırasında sistem sadece çevre ile ısı etkileşiminde bulunabilir.

Toplam ekserji 4 bileşenden oluşur. Bunlar fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ekserji ve potansiyel ekserjidir.

Fiziksel ekserji, sistem başlangıç halinden  $P_0$ , ve  $T_0$  ile ifade edilen çevre haline gelinceye kadar ve sadece çevre ile ısı ilişkisi olması durumunda elde edilen en büyük iş miktarını ifade eder (Kotas, 1995).

Fiziksel ekserji

$$\bar{e}_{ph} = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0 (\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (3.34)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada ekserji birimi kJ/kmol olarak gösterilir. Ekserji hesaplamalarda kW birimi olarak kullanılacağı için birim dönüşümü ile kW birimine çevrilmesi gerekir. Bunun için,

$$E_{ph} = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \cdot [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0 (\bar{s} - \bar{s}_0)] \quad (3.35)$$



bulunur. Burada  $\dot{m}_i$  sisteme giren yada çıkan akımlardan hangisi hesaplanıyorsa onun kütle debisini ifade eder.  $M_i$  ise o akışkanın mol kütleini ifade eder.

Bağıntıdan kolayca görüldüğü gibi fiziksel ekserjiyi hesaplamak için entalpi ve entropi değerlerinin hesaplanması gerekir. Bu hesaplamalar aşağıda gösterilecektir.

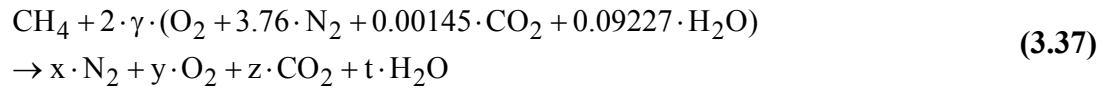
Kimyasal ekserji, inceleme alanı içindeki sistem çevre durumundan ölü hale gelinceye kadar ısı transferi ile birlikte moleküllerin çevre ile etkileşimi sonucu elde edilen en büyük işi ifade eder (**Kotas, 1995**).

O zaman burada ölü hal ile ne ifade edilmeye çalışılıyor onun bilinmesi gerekir. Ölü hal, sistem ile çevre arasında tam bir termodinamik denge bulunduğunda, diğer bir ifadeyle sistem ile çevre arasında sıcaklık ve basıncın yanında moleküllerin kimyasal potansiyelleri de denge halinde olduğu zamanki haldir. Kimyasal ekserji,

$$\bar{e}^{ch} = \sum y_k \bar{e}_k^{ch} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum y_k \cdot \ln y_k \quad (3.36)$$

bağıntısı ile verilir. Buradada kimyasal ekserjinin birimi kJ/kmol'dür. Bunu kW birimine dönüştürmek için, fiziksel ekserji de olduğu gibi hangi akım inceleniyorsa onun kütle debisi ile çarpılıp, daha sonra mol kütleine bölünmesi gerekir.

Doğalgaz yakmalı kazan için fiziksel ekserjiyi hesaplamak için daha önceden de yazılmış olan yanma denklemine ihtiyaç vardır. Bu denklem şu şekildedir:



Denklemin farklı hava fazlalık katsayıları için eşitlenerek x, y, z, t değerlerinin bulunduğu önceden söylenmişti. Entalpi ( $\bar{h}$ ) ve entropi ( $\bar{s}$ ) değerlerinin bulunması gerekir.

Tablo 3.3'de verilen katsayılarla göre  $\bar{h}$  ve  $\bar{s}$  değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesaplanır (**Knache ve diğ, 1991**).

**Tablo 3.3:** Doğalgaz yanması durumunda ekserjiyi bulmak için gerekli olan sabitler (Knache ve diğerleri)

| Bileşen              | H <sup>+</sup> | S <sup>+</sup> | a      | b       | c      | d       |
|----------------------|----------------|----------------|--------|---------|--------|---------|
| N <sub>2</sub> (g)   | -9.982         | 16.203         | 30.418 | 2.544   | -0.238 | 0       |
| O <sub>2</sub> (g)   | -9.589         | 36.116         | 29.154 | 6.477   | -0.184 | -1.017  |
| CO <sub>2</sub> (g)  | -413.886       | -87.078        | 51.128 | 4.368   | -1.469 | 0       |
| H <sub>2</sub> O (g) | -253.871       | -11.750        | 34.376 | 7.841   | -0.423 | 0       |
| H <sub>2</sub> O (s) | -289.932       | -67.147        | 20.355 | 109.198 | 2.033  | 0       |
| CH <sub>4</sub> (g)  | -81.242        | 96.731         | 11.933 | 77.647  | 0.142  | -18.414 |

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + a \cdot y + \frac{b}{2} \cdot y^2 - c \cdot y^{-1} + \frac{d}{3} \cdot y^3 \right] \quad (3.38)$$

$$\bar{s}^\circ = S^+ + a \cdot \ln(T) + b \cdot y - \frac{c}{2} \cdot y^{-2} + \frac{d}{2} \cdot y^2 \quad (3.39)$$

$$\bar{s} = \bar{s}^\circ - 8.314 \cdot \ln \left( \frac{y_u \cdot P_1}{P_0} \right) \quad (3.40)$$

burada,

$$y = \frac{T}{1000} \quad (3.41)$$

değerine eşittir.

Hava ve baca gazları N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O olmak üzere 4 tane bileşenden meydana gelmiştir. Bu yüzden havanın ya da baca gazının ekserjisini bulurken her bir bileşen için ayrı ayrı işlem yapılmalı, daha sonra her bir bileşen kendi molar oranları ile çarpılıp birbiri ile toplanmalıdır. Alt indissiz entalpi ve entropi değerleri akım o anda kaç derece sıcaklıkta ve basınçta ise ona göre hesaplanır. Alt indis olarak 0 ile gösterilen entalpi ve entropi değerleri ise, referans sıcaklığı ve basıncına göre hesaplanır.

Giriş havası için mol oranı önceki bölümde de verildiği gibi %77.48 N<sub>2</sub>, %20.59 O<sub>2</sub>, %0.03 CO<sub>2</sub>, %1.9 H<sub>2</sub>O'dan meydana gelir. Burada önemli olan baca gazları için her bir bileşenin mol oranlarının bulunmasıdır. Yanma sonu baca gazları bileşenleri için mol oranları şu şekilde bulunur.

1-Öncelikle yanma sonu gazları için toplam mol sayısı bulunur.

$$n_{\text{top}}=x+y+z+t \quad (3.42)$$

2-Daha sonra toplam mol sayısı herbir bileşen için mol sayılarına bölünür ve yanma gazları için bileşenlerin molar oranları bulunmuş olur.

$$y_{N_2} = \frac{x}{n_{\text{top}}}, y_{O_2} = \frac{y}{n_{\text{top}}}, y_{CO_2} = \frac{z}{n_{\text{top}}}, y_{H_2O} = \frac{t}{n_{\text{top}}} \quad (3.43)$$

x burada yanma sonu gazları için azotun, y oksijenin, z karbondioksitin, t ise su buharının mol sayısını ifade eder.

Baca gazları için ekserjyi hesaplariken, çevre durumu için yoğuşma durumunun göz önüne alınması gerekir. Bu yüzden 298 K, 1 atm'de baca gazları için yeni mol oranlarının bulunması gerekir. Yoğuşma durumu için yeni mol oranları aşağıdaki gibi bulunur.

Su buharı için yoğuşma gözönüne alındığında,

$$\frac{y_{H_2O}(g)}{y_{N_2}(g)+y_{O_2}(g)+y_{CO_2}(g)+y_{H_2O}(g)} = \frac{3.17}{100} \quad (3.44)$$

yardımı ile yoğuşma durumu göz önüne alındığı zaman su buharının gaz durumunda mol oranı bulunmuş olur. 25 °C için su buharının doyma basıncı 0.0317 bara eşittir. O basınçtaki su buharının mol oranı ise  $p_v = y_{H_2O} \cdot p$  bağıntısı ile bulunur. Çevre şartları için p basıncı atmosfer basıncını ifade eder.  $y_{H_2O}$  ise baca gazlarındaki su buharının mol oranını ifade eder.

Yoğuşma durumu için sıvı haldeki suyun mol oranı ise,

$$y_{H_2O(s)} = y_{H_2O} - y_{H_2O(g)} \quad (3.45)$$

olarak bulunmuş olur. Bu sayede mol oranları  $y_{N_2}(g)$ ,  $y_{O_2}(g)$ ,  $y_{CO_2}(g)$ ,  $y_{H_2O}(g)$  ve  $y_{H_2O}(s)$  şeklinde bölünmüş olur.

Yoğuşma durumunda gazların yeni mol oranları ise,

$$y'_{N_2}(g) = \frac{y_{N_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{H_2O}(g)} \quad (3.46)$$

$$y'_{O_2}(g) = \frac{y_{O_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{H_2O}(g)} \quad (3.47)$$

$$y'_{CO_2}(g) = \frac{y_{CO_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{H_2O}(g)} \quad (3.48)$$

$$y'_{H_2O}(g) = \frac{y_{H_2O}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{H_2O}(g)} \quad (3.49)$$

$$y'_{H_2O}(s) = y_{H_2O}(s) \quad (3.50)$$

şeklinde bulunmuş olur.

Bulunan yeni molar oranlar yanma sonrası ürünleri için referans halinde  $\bar{h}_0$  ve  $\bar{s}_0$  değerlerini bulmak için kullanılır. Referans halinde entalpi ve entropi değeri

$$\begin{aligned} \bar{h}_0 = & y_{N_2}(g) \cdot \bar{h}_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) \cdot \bar{h}_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) \cdot \bar{h}_{CO_2}(g) \\ & + y_{H_2O}(g) \cdot \bar{h}_{H_2O}(g) + y_{H_2O}(s) \cdot \bar{h}_{H_2O}(s) \end{aligned} \quad (3.51)$$

ve,

$$\begin{aligned} \bar{s}_0 = & y_{N_2}(g) \cdot \bar{s}_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) \cdot \bar{s}_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) \cdot \bar{s}_{CO_2}(g) \\ & + y_{H_2O}(g) \cdot \bar{s}_{H_2O}(g) + y_{H_2O}(s) \cdot \bar{s}_{H_2O}(s) \end{aligned} \quad (3.52)$$

şeklinde hesaplanmış olur. Burada her bir baca gazı bileşeni için 298 K'de  $\bar{s}$  bileşeni,

$$\bar{s}_o = \bar{s}_o^\circ - 8.314 \cdot \ln \left( \frac{y'_k \cdot P_0}{P_0} \right) \quad (3.53)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

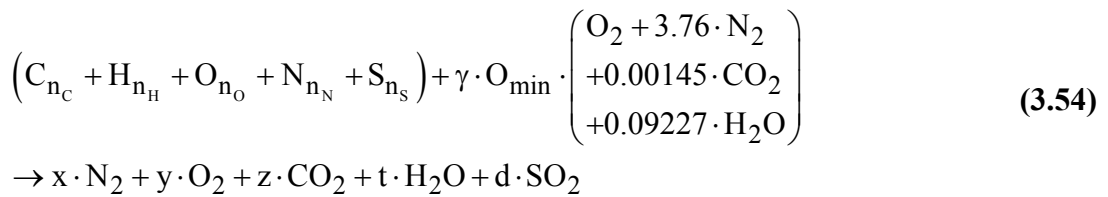
Doğalgazın fiziksel ekserjisini bulmak içinde aynı yöntem uygulanır. Hatta doğalgaz sadece bir bileşenden meydana geldiği için üstteki tabloda verilen değer ile entalpi ve entropi değişimi kJ/kmol biriminde bulunur. Burada incelenen sistem için doğalgazın girişi 298 K olduğu için entalpi farkı, çevrede aynı sıcaklıkta olduğu için 0 olmaktadır. Yakıtın giriş basıncı farklı olduğu için sadece entropi farkı nedeni ile fiziksel ekserji oluşur.

Doğalgaz için kimyasal ekserji tablolardan alınmıştır.

Hava girişi için kimyasal ekserji çok küçük bir değerde olduğu için ihmal edilmiştir.

Kömür yakan kazan içinde aynen doğalgaz yakan kazanda olduğu gibi hava ve baca gazlarının ekserji hesabı yapılır. Fakat kömür yakan kazanda ayrıca baca gazları olarak kükürtdioksit de ortaya çıkar. Bu yüzden kükürtdioksitin de hesaplamalarda göz önünde bulundurulması gerekir.

Kömür yakan kazan için önceden yazılmış olan yanma denklemi bir kez daha hatırlanırsa,



bütün ekserji hesapları üstteki denkleme göre yapılır. Buna göre kömür yakmalı kazan için ekserji hesabında kullanılacak katsayılar, Tablo 3.4'de verilmiştir.

Hava ve baca gazları için buldukları sıcaklık ve basınç ile referans hali için entalpi ve entropi değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımı ile, doğalgaz yanması durumu kısmında yapılan hesaplamalar gibi yapılır (**Knache ve diğ, 1991**).

**Tablo 3.4:** Kömür yanması durumunda ekserjiyi bulmak için gerekli olan sabitler

| Bileşen              | H <sup>+</sup> | S <sup>+</sup> | a      | b       | c      | d      |
|----------------------|----------------|----------------|--------|---------|--------|--------|
| N <sub>2</sub> (g)   | -9.982         | 16.203         | 30.418 | 2.544   | -0.238 | 0      |
| O <sub>2</sub> (g)   | -9.589         | 36.116         | 29.154 | 6.477   | -0.184 | -1.017 |
| CO <sub>2</sub> (g)  | -413.886       | -87.078        | 51.128 | 4.368   | -1.469 | 0      |
| H <sub>2</sub> O (g) | -253.871       | -11.750        | 34.376 | 7.841   | -0.423 | 0      |
| SO <sub>2</sub> (g)  | -315.422       | -43.725        | 49.936 | 4.766   | -1.046 | 0      |
| H <sub>2</sub> O (s) | -289.932       | -67.147        | 20.355 | 109.198 | 2.033  | 0      |

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + a \cdot y + \frac{b}{2} \cdot y^2 - c \cdot y^{-1} + \frac{d}{3} \cdot y^3 \right] \quad (3.55)$$

$$\bar{s}^\circ = S^+ + a \cdot \ln(T) + b \cdot y - \frac{c}{2} \cdot y^{-2} + \frac{d}{2} \cdot y^2 \quad (3.56)$$

$$\bar{s} = \bar{s}^\circ - 8.314 \cdot \ln \left( \frac{y_k \cdot P_1}{P_0} \right) \quad (3.57)$$

burada,

$$y = \frac{T}{1000} \quad (3.58)$$

değerine eşittir.

Yoğuşma durumu doğalgaz yakan kazan durumunda olduğu gibi göz önüne alınır.

Buna göre,

1. Yanma gazları için toplam mol sayısı bulunur. Burada

$$n_{\text{top}} = x + y + z + t + d \quad (3.59)$$

ile ifade edilir.

2. Toplam mol sayıları her bir bileşenin mol sayılarına bölünerek her bir bileşen için mol oranları bulunur.

$$y_{N_2} = \frac{x}{n_{top}}, y_{O_2} = \frac{y}{n_{top}}, y_{CO_2} = \frac{z}{n_{top}}, y_{H_2O} = \frac{t}{n_{top}}, y_{SO_2} = \frac{d}{n_{top}} \quad (3.60)$$

Bu kısımda sadece doğalgaz yanmasından farklı olarak d katsayısı ile yanma gazları içindeki SO<sub>2</sub> bileşeni gözönüne alınmıştır.

Yine baca gazları için ekserjiyi hesaplarken, çevre halinde yoğuşma gözönüne alınacağı için yoğuşma durumu için yeni mol oranları bulunur. Buna göre,

$$\frac{y_{H_2O}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{SO_2}(g) + y_{H_2O}(g)} = \frac{3.17}{100} \quad (3.61)$$

ile yoğuşma durumu göz önüne alındığı zaman su buharının gaz durumunda mol oranı bulunmuş olur.

Yoğuşma durumu için sıvı haldeki suyun mol oranı ise,

$$y_{H_2O}(s) = y_{H_2O} - y_{H_2O}(g) \quad (3.62)$$

ile bulunur. Bu sayede mol oranları  $y_{N_2}(g)$ ,  $y_{O_2}(g)$ ,  $y_{CO_2}(g)$ ,  $y_{SO_2}(g)$ ,  $y_{H_2O}(g)$  ve  $y_{H_2O}(s)$  şeklinde bulunmuş olur.

Yoğuşma durumunda baca gazlarının yeni mol oranları ise,

$$y'_{N_2}(g) = \frac{y_{N_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{SO_2} + y_{H_2O}(g)} \quad (3.63)$$

$$y'_{O_2}(g) = \frac{y_{O_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{SO_2} + y_{H_2O}(g)} \quad (3.64)$$

$$y'_{CO_2}(g) = \frac{y_{CO_2}(g)}{y_{N_2}(g) + y_{O_2}(g) + y_{CO_2}(g) + y_{SO_2} + y_{H_2O}(g)} \quad (3.65)$$

$$y'_{\text{SO}_2}(\text{g}) = \frac{y_{\text{SO}_2}(\text{g})}{y_{\text{N}_2}(\text{g}) + y_{\text{O}_2}(\text{g}) + y_{\text{CO}_2}(\text{g}) + y_{\text{SO}_2} + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g})} \quad (3.66)$$

$$y'_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g}) = \frac{y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g})}{y_{\text{N}_2}(\text{g}) + y_{\text{O}_2}(\text{g}) + y_{\text{CO}_2}(\text{g}) + y_{\text{SO}_2} + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g})} \quad (3.67)$$

$$y'_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) = y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) \quad (3.68)$$

şeklinde bulunur.

Buna göre  $\bar{h}_0$  ve  $\bar{s}_0$  değerlerini bulmak için sadece üstte yazılmış olan formüle  $\text{SO}_2$  için yeni bir katsayı ilave edilir.

$$\begin{aligned} \bar{h}_0 = & y_{\text{N}_2}(\text{g}) \cdot \bar{h}_{\text{N}_2}(\text{g}) + y_{\text{O}_2}(\text{g}) \cdot \bar{h}_{\text{O}_2}(\text{g}) + y_{\text{CO}_2}(\text{g}) \cdot \bar{h}_{\text{CO}_2}(\text{g}) \\ & + y_{\text{SO}_2}(\text{g}) \cdot \bar{h}_{\text{SO}_2}(\text{g}) + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g}) \cdot \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g}) + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) \cdot \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) \end{aligned} \quad (3.69)$$

ve,

$$\begin{aligned} \bar{s}_0 = & y_{\text{N}_2}(\text{g}) \cdot \bar{s}_{\text{N}_2}(\text{g}) + y_{\text{O}_2}(\text{g}) \cdot \bar{s}_{\text{O}_2}(\text{g}) + y_{\text{CO}_2}(\text{g}) \cdot \bar{s}_{\text{CO}_2}(\text{g}) \\ & + y_{\text{SO}_2}(\text{g}) \cdot \bar{s}_{\text{SO}_2}(\text{g}) + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g}) \cdot \bar{s}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{g}) + y_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) \cdot \bar{s}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{s}) \end{aligned} \quad (3.70)$$

şeklinde hesaplanır. Burada her bir baca gazı için 298 K'de  $\bar{s}$  bileşeni,

$$\bar{s} = \bar{s}^\circ - 8.314 \cdot \ln \left( \frac{y'_k \cdot P_0}{P_0} \right) \quad (3.71)$$

### 3.5. Giren Kömürün Ekserjisinin Hesabı

Kömürün ekserjisini hesaplamak için Alok Srivastava tarafından yazılmış olan “Second Law (Exergy) Analysis of Various Types of Coal” isimli makalede gösterilmiş olan hesap yöntemi dikkate alınmıştır (**Srivastava, 1988; Bilgen ve diğ., 2004**).



Buna göre, eğer  $n'_O/n'_C \leq 0.5$  ise,

$$\begin{aligned} \text{Ekserji}_{\text{kömür}} = & 443.34208 \cdot n'_C + 105.30292 \cdot n'_H \\ & -184.17053 \cdot n'_O + 32.65797 \cdot n'_N + 513.159 \cdot n'_S \end{aligned} \quad (3.72)$$

eğer  $n'_O/n'_C \leq 1$  ise,

$$\begin{aligned} \text{Ekserji}_{\text{kömür}} = & 441.41299 \cdot n'_C + 106.98818 \cdot n'_H \\ & -171.1451 \cdot n'_O + 20.59097 \cdot n'_N + 513.159 \cdot n'_S \end{aligned} \quad (3.73)$$

bağıntısı kullanılır. Buradan bulunan ekserji değerlerinin birimi MJ/kg değerindedir. Burada unutulmaması gereken kısım kömürün ekserjisini hesaplarırken alınmış olunan mol sayıları yakıtın 1 kg girmesi gibi düşünerek, normalizasyon yapılmadan önce bulunmuş olan mol sayılarıdır.

### 3.6. Tersinmezlik

Tersinir iş, belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en çok yararlı iş diye tanımlanır ve  $W_{tr}$  diye ifade edilir. Bu iş, ilk ve son haller arasındaki hal değişimi tümünden tersinir olarak gerçekleştiği zaman elde edilir. Başka bir deyişle, sistemle çevre arasındaki ısı geçişinin tersinir olarak gerçekleştiği, ayrıca sistem içinde tersinmezliklerin olmadığı bir durum söz konusudur. Son hal ölü hal olduğu zaman tersinir iş kullanılabilirliğe eşit olur. İş gerektiren hal değişimleri için tersinir iş, hal değişimini gerçekleştirmek için gerekli en az işi gösterir (**Çengel ve Boles, 1996**).

Tersinir iş ile gerçek yararlı iş ( $W_y$ ) arasındaki fark hal değişimi sırasında tersinmezliklerden kaynaklanır ve tersinir iş ile gerçek yararlı iş arasındaki fark tersinmezliği ifade eder.

Önceden de tanımlı yapıldığı gibi, ekserji tersinir bir süreç sonucunda, çevre ile denge sağlandığı takdirde teorik olarak elde edilen en yüksek iş miktarını ifade etmektedir. Buna göre ekserji dengesi şu şekilde ifade edilir (**Çengel ve Boles, 1996**).

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\phi - \sum \dot{E}_{\text{kayıp}} = 0 \quad (3.74)$$

Kayıp ekserji de

$$\dot{E}_{\text{kayıp}} = T_0 \cdot \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (3.75)$$

şeklinde de ifade edilir. Kayıp iş yani tersinmezlik en yüksek iş ile yararlı iş arasındaki fark olduğu için,

$$W_{\text{kayıp}} = W_{\text{mak}} - W_{\text{yararlı iş}} = \dot{E}_{\text{kayıp}} \quad (3.76)$$

şeklinde de yazılabilir (**Çengel ve Boles, 1996**). Burada incelenen sistem için giren akımlar 1,2,4 numaralı akımlar olup, kazandan çıkan akımlar 3 ve 5 numaralı akımlar olduğuna göre 3.65 numaralı bağıntıya göre ekserji kaybı;

$$\dot{E}_{\text{kayıp}} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_4 - \dot{E}_3 - \dot{E}_5 \quad (3.77)$$

şeklinde ifade edilir.

Tersinmezlik, sistemde entropinin üretimi ile ilgilidir. Entropi enerji gibi değildir, yani entropinin korunumu diye bir kavramdan söz edilemez. Termodinamiğin birinci yasasına göre, ısı geçişi ile iş arasında enerji geçişi olarak bir ayırım yapılamaz. Termodinamiğin birinci yasasına göre ısı geçişi ve iş eşdeğerdir. Isı geçişi ile iş arasındaki ayırım termodinamiğin ikinci yasası tarafından ortaya çıkar. Yani, entropi geçişi ile birlikte gerçekleşen enerji etkileşimi ısı geçiştir, entropi geçişinin olmadığı enerji etkileşimi ise iştir. Bir sistemle çevresi arasında olan iş etkileşimi sırasında entropi alışverişi yoktur. Böylece, sistemle çevresi arasındaki iş etkileşimi sırasında sadece enerji alışverişi olur, oysa ısı geçişi sırasında hem enerji hem entropi geçişi söz konusudur. Tersinmez bir hal değişimi sırasında bir miktar entropi üretilir. Zaten entropi üretimi sistemdeki tersinmezliklerin bir ölçüsüdür. Üretilen entropi ise  $S_{\text{üretim}}$  ile ifade edilir.

## 4. EKONOMİK ÇÖZÜMLEME

Termoekonomi, ekserji çözümlemesi ile ekonomik çözümleme prensiplerini birbiri ile ilişkilendiren bir daldır. Termoekonomi sadece enerji analizi ile ya da ekonomik analiz ile elde edilemeyen, fakat mali yönden verimli bir sistemin dizaynı ve operasyonu için gerekli bilgilerin elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Termoekonomi, ekserjiye bağlı maliyetin azaltılması olarak tanımlanabilir (**Bejan ve diğ, 1996**).

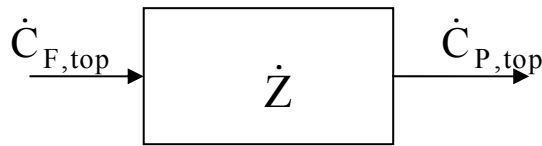
### 4.1. Maliyet Denge Denklemi

Maliyet denge denklemine göre incelenen bir sistemde bütün dışarı çıkan akımların toplam maliyeti; sisteme giren akımların toplam maliyeti ile yatırım, operasyon ve bakım giderlerinin toplamına eşittir. (**Tsatsaronis, 1993**).

Buna göre maliyet denge denklemi,

$$\dot{C}_{P,top} = \dot{C}_{F,top} + \dot{Z} \quad (4.1)$$

biçiminde yazılabilir.



**Şekil 4.1:** Kazan için ekserjiye bağlı maliyetin şematik gösterimi

Burada  $\dot{C} = c \cdot \dot{E}$  olup,

$\dot{E}$  ekserji akısını,  $c$  birim ekserji başına maliyeti (\$/kJ),  $\dot{C}$  maliyet akısını (\$/s) ifade eder.

İncelenen sistem kazan olduğu için kazanda üretilen buharın maliyeti bulunmaya çalışılmıştır.

#### 4.2. Doğalgaz Yakan Kazan İçin Buharın Maliyeti

Yukarıda verilen genel maliyet denge denklemi doğalgaz yakan kazana uygulanırsa maliyet denge denklemi şekil 3.1’de gösterilen kazan için kontrol hacmine uygulanırsa,

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_4 + \dot{Z} = \dot{C}_3 + \dot{C}_5 \quad (4.2)$$

biçiminde yazılabilir.

Girişte hava ve su için birim ekserji maliyeti 0 alınmıştır. Baca gazı doğrudan atmosfere atıldığı için birim ekserji maliyeti 0 alınırsa denklem;

$$\dot{C}_2 + \dot{Z} = \dot{C}_5 \quad (4.3)$$

olacak şekilde basitleştirilebilir. Bu durumda buharın birim ekserji başına maliyeti (\$/kJ);

$$c_5 = \left( \frac{c_2 \cdot \dot{E}_2 + \dot{Z}}{\dot{E}_5} \right) \quad (4.4)$$

bağıntısı ile gösterilebilir. Burada  $c_2$  değeri yakıtın birim ekserji maliyetidir. Kullanılan yakıt doğalgaz olduğu için doğalgazın sanayi satış fiyatından bulunur.

Hesaplamalarda geri dönüş oranı %15, kazanın ömrü olarak 20 yıl alınmıştır. Dolayısıyla CRF 0.15 bulunmuştur.

Kazanın fiyatı olarak doğalgaz kazanında doymuş buhar üreten kazan 55000 YYL ve sıcak su üreten kazan ise 17000 YTL olarak alınmıştır.

Doğalgazın fiyatı sanayiye satış fiyatı olan 0.039 YTL/kWh olarak alınmıştır.

### 4.3. Kömür Yakan Kazan İçin Buharın Maliyeti

Kömür yakan kazan içinde buharın maliyetini bulmak için yapılan işlem aslında temel prensipleri bakımından doğalgaz kazanı için yapılan işlemin aynısıdır. Kömür yakmalı kazanda da genel maliyet denge denklemi ve yapılan kabuller doğalgaz kazanı için yapılan kabullerin aynısıdır.

Buna göre tekrar

$$\dot{C}_2 + \dot{Z} = \dot{C}_5 \quad (4.5)$$

bağıntısı elde edilmiş olur. Burada yakıtın sadece fiyatı girdisi değişik olmaktadır.

$$c_5 = \left( \frac{f_2 \cdot \dot{m}_2 + \dot{Z}}{\dot{E}_5} \right) \quad (4.6)$$

şeklinde olur. Burada  $\dot{m}_2$  yakıtın kütle debisini ve  $f_2$  değeri yakıtın birim kütle başına fiyatını ifade eder.

Kömür yakmalı kazan için ise kazan fiyatı doymuş buhar üreten kazanda 52000 YTL ve sıcak su üreten kazanda ise 40000 YTL olarak alınmıştır.

Kömürün fiyatı Amasra kömürünün sanayiye satış fiyatı olan 150 YTL/ton olarak alınmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE İRDELEME

Önceki bölümlerde açıklanan kazan kazan modelinin simülasyonu bir program aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Hesaplamaları yaparken kullanılan parametreler hava fazlalık katsayısı, kazandaki suyun basıncı ve sıcaklığıdır. Çözümleme kazandan sıcak su veya buhar elde edilmesi durumu ile doğalgaz veya kömürün yakıt olarak kullanılması durumu için yapılmıştır.

### 5.1. Doğalgaz Yanması İçin Elde Edilen Sonuçlar

Yanma sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklığın hesaplanması için uygulanan yöntem 3. bölümde verilmişti. Hava fazlalık katsayısının değişimine göre doğalgaz yakan kazan içindeki en yüksek sıcaklıklar bu yöntemle hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1:** 1000 kW gücünde doğalgaz yakan kazanda elde edilen en yüksek sıcaklıklar (K)

|                         |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|
| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
| En Yüksek Sıcaklık      | 2080 | 2023 | 1969 |

Tablodan da anlaşıldığı gibi hava fazlalık katsayısı arttıkça kazan içindeki en yüksek yanma sıcaklığı düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur.

Doğalgaz yanması durumu için yakıt ve havanın kütle debilerinin değişimi Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2:** 1000 kW gücünde doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları için yakıtın ve havanın kütle debilerinin değişimi (kg/s)

|                                 |         |         |         |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| Hava Fazlalık Katsayısı         | 1.15    | 1.20    | 1.25    |
| $\dot{m}_{\text{hava}}$ (kg/s)  | 0.43870 | 0.45817 | 0.47770 |
| $\dot{m}_{\text{yakıt}}$ (kg/s) | 0.02142 | 0.02147 | 0.02152 |

Hava fazlalık katsayısının artması demek, kazana daha fazla havanın girmesi demektir. Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının artışı ile

birlikte kazan içindeki havanın kütle debisi artmaktadır. Yakıtın kütle debisi yanma denkleminde göre bulunmaktadır ve hava fazlalık katsayısı ile aynı yönde küçük bir artış göstermektedir.

Doğalgaz yanması için suyun kütle debilerinin hesaplanma yöntemi 3. bölümde verildiği için bu kısımda hava fazlalık katsayısına göre ve kazandan değişik çıkış şartlarına göre doğalgaz yakan kazan için suyun kütle debisi verilmiştir. Su debileri kg/s biriminde verilmiştir.

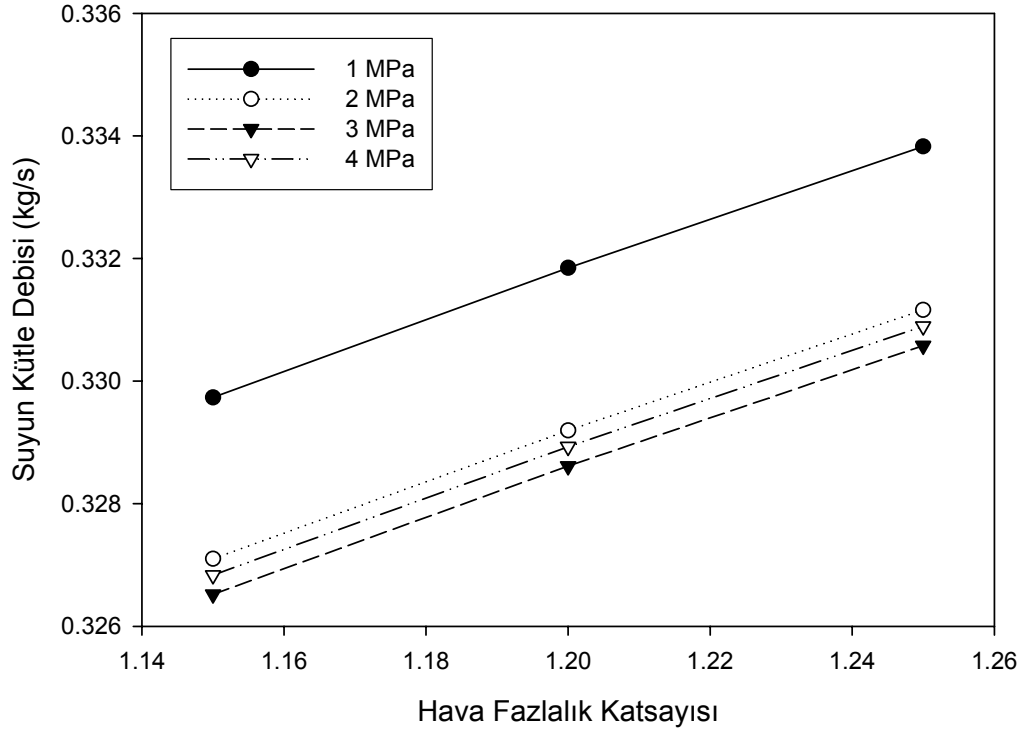
**Tablo 5.3:** Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar halinde çıkış halleri için suyun kütle debisi

| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15  | 1.20  | 1.25  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| 1 MPa                   | 0.329 | 0.332 | 0.334 |
| 2 MPa                   | 0.327 | 0.329 | 0.331 |
| 3 MPa                   | 0.326 | 0.328 | 0.330 |
| 4 MPa                   | 0.327 | 0.329 | 0.331 |

Tabloya göre hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte aynı basınçta suyun kütle debisi artmaktadır.

Bunun yanı sıra basınç artışı ile birlikte aynı hava fazlalık katsayısında suyun kütle debisi azalma göstermektedir. Termodinamik tabloları incelendiği zaman görülmektedir ki su kazandan doymuş buhar halinde çıkarsa entalpisi yüksek değerlere ulaşır. Suyun giriş hali kazanda aynı olduğu için çıkış halindeki entalpi değeri suyun kütle debisini etkileyen faktördür.

Doymuş buhar halinde suyun çıkışı hali için kütle debisinin değişiminin grafiksel olarak gösterimi ise Şekil 5.1' deki gibidir.



**şekil 5.1:** Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi

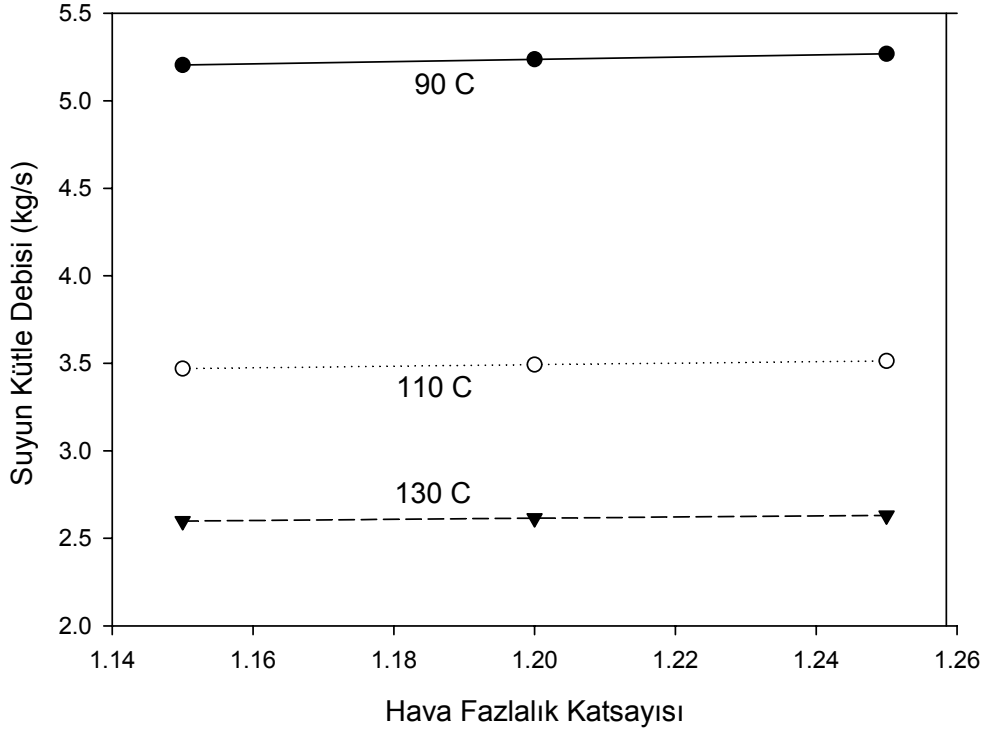
Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkışı halinde ise suyun kütlesel debisinin değişimi aşağıdaki gibidir. Su debileri kg/s biriminde verilmiştir.

**Tablo 5.4:** Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su halinde çıkış için suyun kütle debisi

| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
|-------------------------|------|------|------|
| 90°C                    | 5.20 | 5.23 | 5.27 |
| 110°C                   | 3.47 | 3.49 | 3.51 |
| 130°C                   | 2.59 | 2.61 | 2.63 |

Sıcak su halinde çıkış durumu için suyun kütle debisinin değişiminin grafiksel olarak gösterimi şekil 5.2'deki gibidir.





**Şekil 5.2:** Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi

Sıcak su ve doymuş buhar halinde çıkış şartları için kütle debileri karşılaştırıldığı zaman görülmektedir ki sıcak su çıkışı hali için suyun kütle debileri doymuş buhar halinde çıkış durumundaki debilerden fazla olmaktadır. Bu durum kazandan çıkan su ile kazana giren suyun entalpi farkı ile açıklanabilir. Doymuş buhar halinde çıkış için giriş ile çıkış arasındaki entalpi farkı, sıcak su halindeki çıkıştan çok yüksek değerdedir. Bu da suyun kütle debisinin sıcak su çıkışı halinde çok daha fazla olmasını sağlar.

Bütün bunlara ek olarak sadece sıcak su kazanından çıkış hali incelenirse, sıcak su kazanında sıcaklık arttıkça suyun kütle debisindeki azalma daha büyük oranda olmaktadır. Bu durum da çıkış halindeki entalpi farkı ile açıklanabilir. Sıcaklık artışı ile birlikte sıcak su çıkışı için entalpi büyük oranda artış göstermektedir. Bu da sıcaklık artışı ile birlikte suyun kütle debisinin değişiminin çok daha fazla olmasını sağlar.

3. bölümde kazandaki tersinmezliklerin hesaplanması yöntemi verilmişti. Bu kısımda ise farklı çıkış halleri için tersinmezlikler tablo halinde verilmiştir.

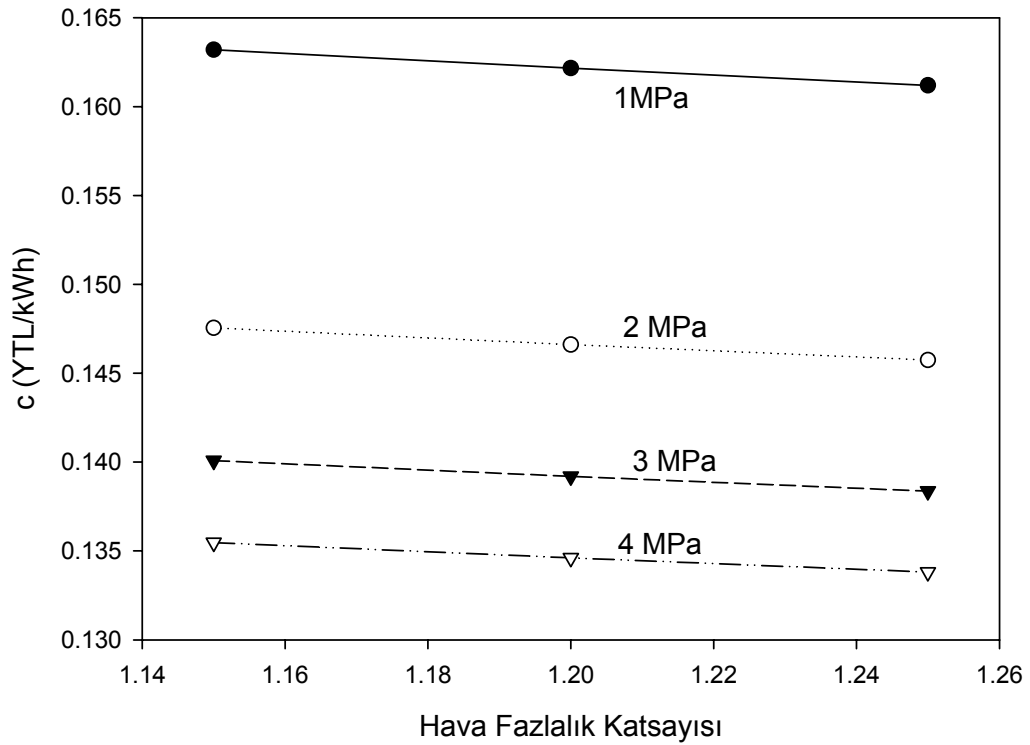
**Tablo 5.5:** Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar çıkışı halindeki tersinmezlik (kW)

| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15  | 1.20  | 1.25  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| 1 MPa                   | 823.4 | 824.5 | 825.9 |
| 2 MPa                   | 794.4 | 795.4 | 796.5 |
| 3 MPa                   | 778.6 | 779.5 | 780.5 |
| 4 MPa                   | 767.8 | 768.7 | 769.6 |

**Tablo 5.6:** Doğalgaz yakan kazanda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su çıkışı halindeki tersinmezlik (kW)

| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15  | 1.20  | 1.25  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| 90°C                    | 979.4 | 981.6 | 983.8 |
| 110°C                   | 958.3 | 960.4 | 962.5 |
| 130°C                   | 938.7 | 940.6 | 942.6 |

Birim ekserji başına maliyeti hesaplamak için kullanılan yöntem 4. bölümde anlatılmıştı. Bu kısımda kazandan farklı çıkış halleri için birim ekserji başına maliyet değerlerinin hava fazlalık katsayısı ile değişimi grafiksel olarak verilmiş ve yorumlanmıştır.

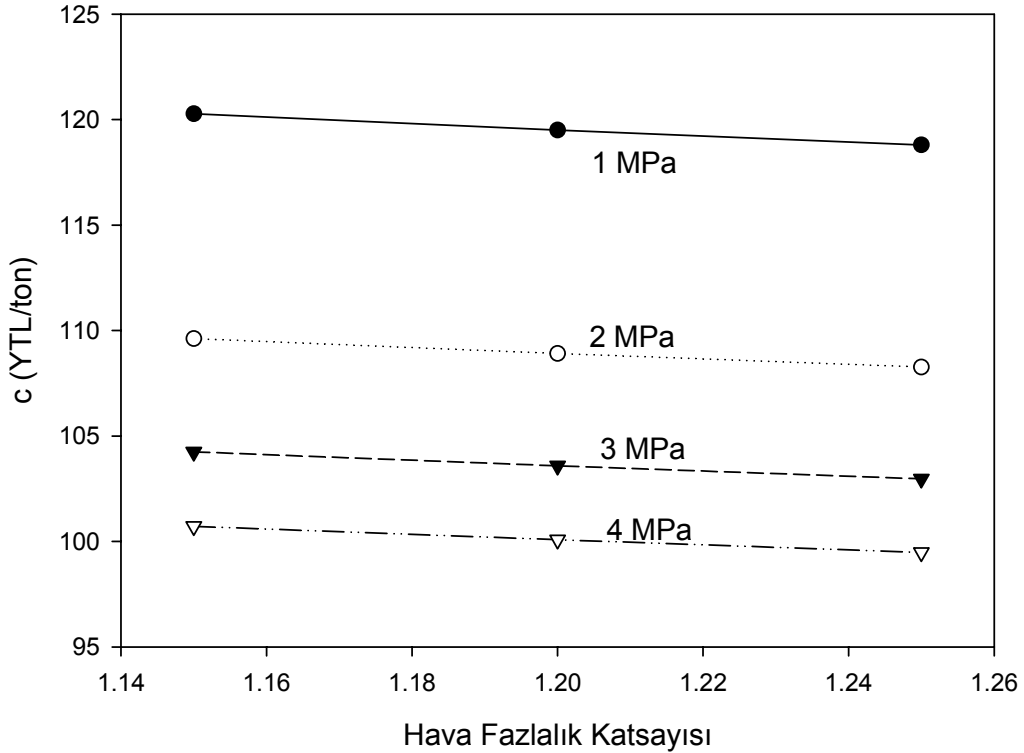


**Şekil 5.3:** Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için birim ekserji başına maliyet

Şekil 5.3'ten açıkça görüldüğü gibi çıkışta basıncın artışı ile birlikte doymuş buhar için birim ekserji başına maliyet değeri azalır. Bunun nedeni basıncın artışı ile birlikte çıkışta suyun özgül ekserjisinin artmasıdır.

Ayrıca aynı çıkış basıncında hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte birim ekserji başına maliyet değeri azalır. Bu durumun nedeni ise, suyun kütle debisinin, aynı basınçta çıkış halinde hava fazlalık katsayısının artışı ile artması nedeniyledir. Bu da göstermektedir ki doymuş buhar üreten kazanlar için suyun kütleli debisi arttıkça birim ekserji başına maliyet değeri azalma gösterir.

Doymuş buhar çıkışı hali için buharın birim ton başına maliyeti aşağıdaki gibidir.



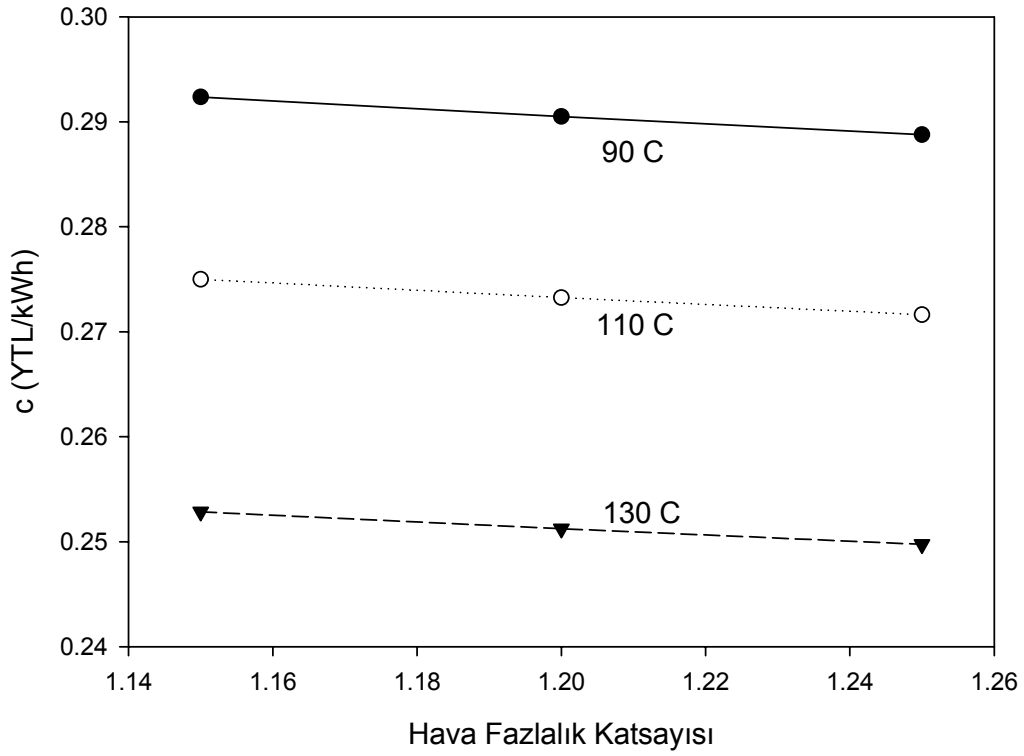
**Şekil 5.4:** Doğalgaz yakan kazanda doymuş buhar çıkış hali için birim ton başına maliyet

Doğalgazın maliyetinin yüksek olması nedeni ile birim ton başına maliyet doğalgaz yakan kazanda yüksektir. Bu durum Şekil 5.4'ten de gözlemlenebilir.

Bunun yanı sıra kazana girişte suyun sıcaklığı da 30°C alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu da maliyetin yüksek olmasını sağlar. Sıcak su kazanında görüleceği gibi, suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça birim ton başına maliyet değeri azalır.

Basıncın artışı ile birlikte birim ton başına maliyetin azalma eğiliminde olmasının nedeni, doymuş buhar çıkış halinde ekserji değerinin su sıcaklığının artışı ile birlikte artmasıdır.

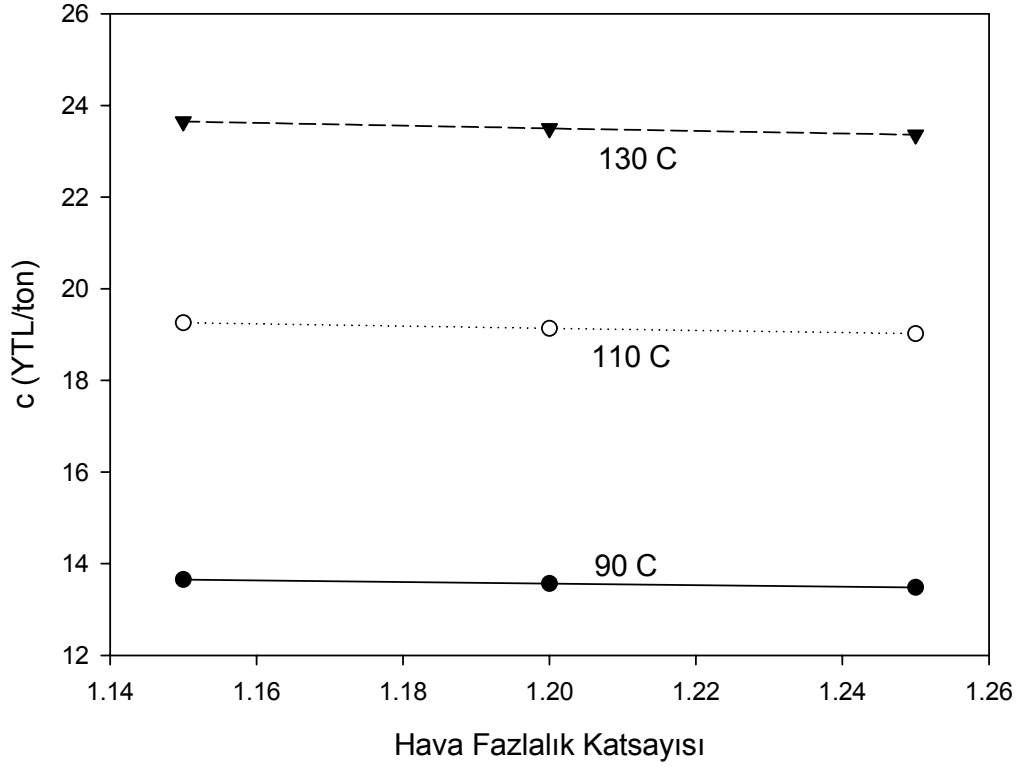
Kazandan sıcak su çıkışı için birim ekserji ve birim ton başına maliyet değerleri ise Şekil 5.5 ve 5.6'daki gibidir.



**Şekil 5.5:** Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için birim ekserji başına maliyet

Kazandan sıcak su çıkış halinde ise sıcak suyun çıkış sıcaklığı arttıkça birim ekserji başına maliyet azalmaktadır. Bu durum çıkış halindeki suyun ekserjisi ile açıklanabilir. Çıkışta sıcak suyun sıcaklığı arttıkça çıkış halindeki ekserjisinin artışı birim ekserji başına maliyeti düşürür.

Hava fazlalık katsayısının değiştiği durumda yapılan incelemeler göz önüne alındığında, doymuş buhar çıkışı hali için yapılan yorumun aynısı yapılabilir. Hava fazlalık katsayısı artıyor iken suyun kütleli debisi de arttığı için sıcak su kazanlarında da birim ekserji başına maliyet hava fazlalık katsayısının artışı ile azalır.



**Şekil 5.6:** Doğalgaz yakan kazanda sıcak su çıkış hali için birim ton başına maliyet değerleri

Sıcak su çıkışı halinde birim ton başına maliyet değerleri doymuş buhar çıkışı halindeki birim ton başına maliyet değerlerinden çok daha düşüktür. Bunun nedeni ise suyun girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkının çok fazla olmamasıdır. Suyun girişi ile çıkışı arasındaki entalpi farkı doymuş buhar üreten kazanda olduğu gibi yüksek değerlere ulaşmaz ve bundan dolayı birim ton başına buharın maliyeti sıcak su kazanlarında daha düşük olur.

## 5.2. Kömür Yanması İçin Sonuçlar

Kazan içinde kömür yanması halinde elde edilen sıcaklıklar hava fazlalık katsayısının yanında kömürün içindeki bileşenlerin % oranlarına göre de değişiklik gösterir. Bu kısımda Amasra kömürü için yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklıklar verilmiştir.

**Tablo 5.7:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda kazanda elde edilen en yüksek sıcaklıklar (K)

|                         |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|
| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
| En Yüksek Sıcaklık      | 2132 | 2070 | 2012 |

Doğalgaz kazanlarında olduğu gibi kömür kazanlarında da hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte kazanda elde edilen en yüksek yanma sıcaklığı düşer.

Kömür yakmalı kazan için hava ve yakıtın kütle debilerinin hesaplanmaları da 3. bölümde anlatılmıştı. Bu kısımda hesaplamalar sonucu elde edilen kütle debileri verilmiştir.

**Tablo 5.8:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları için yakıtın ve havanın kütle debilerinin değişimi (kg/s)

|                          |         |          |         |
|--------------------------|---------|----------|---------|
| Hava Fazlalık Katsayısı  | 1.15    | 1.20     | 1.25    |
| $\dot{m}_{\text{hava}}$  | 0.43323 | 0.4538   | 0.47378 |
| $\dot{m}_{\text{yakıt}}$ | 0.03077 | 0.030842 | 0.03091 |

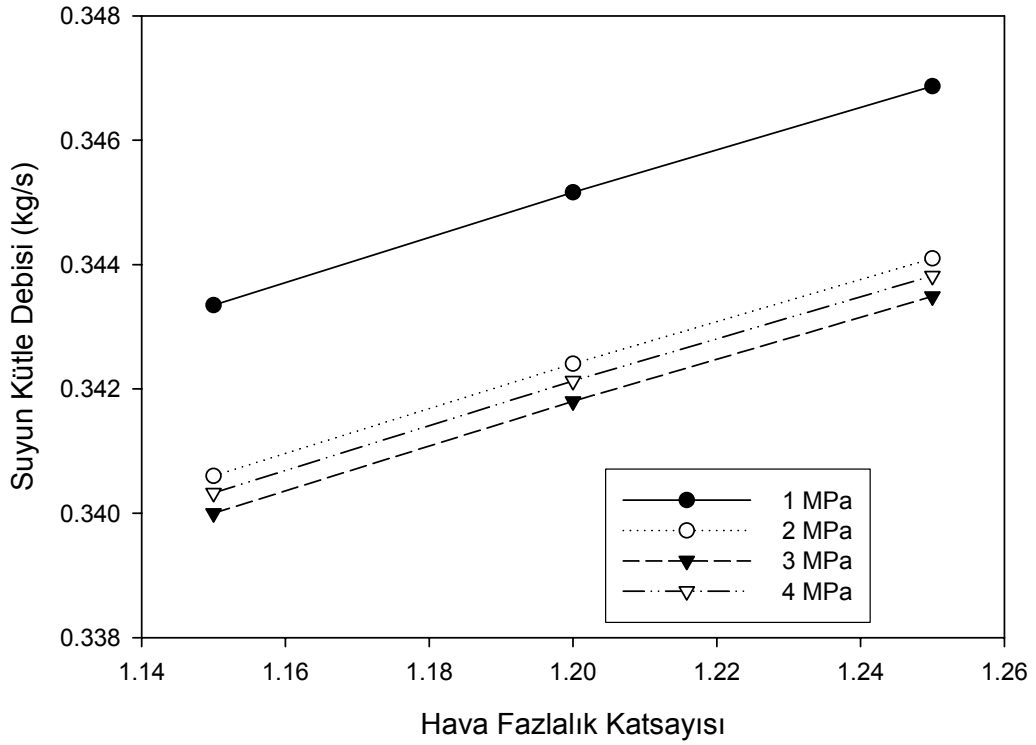
Kömür yakmalı kazanda suyun kütle debisinin hesaplanması da 3. bölümde anlatılmıştı. Bu nedenle bu kısımda kütle debileri verilmiştir.

**Tablo 5.9:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları ve doymuş buhar çıkış halleri için suyun kütle debisi (kg/s)

|                         |       |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15  | 1.20  | 1.25  |
| 1 MPa                   | 0.343 | 0.345 | 0.347 |
| 2 MPa                   | 0.341 | 0.342 | 0.344 |
| 3 MPa                   | 0.340 | 0.341 | 0.343 |
| 4 MPa                   | 0.340 | 0.342 | 0.344 |

Kütle debisinin değişimi doğalgaz kazanlarında elde etmiş olduğumuz basınç değişimi ve hava fazlalık katsayısının değişimine bağlı olarak bulunan sonuçlara benzerdir. Aynı hava fazlalık katsayısı değerinde basıncın artışı ile birlikte doymuş buharın kütle debisi çıkışta entalpinin artışı nedeni ile azalır, fakat 4 MPa değerinde çıkıştaki entalpi azalmaya başladığı için doymuş buharın kütle debisi artmaya başlar.

Doymuş buhar çıkışı için kütle değişimini grafiksel olarak ifade edersek,



**Şekil 5.7:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi

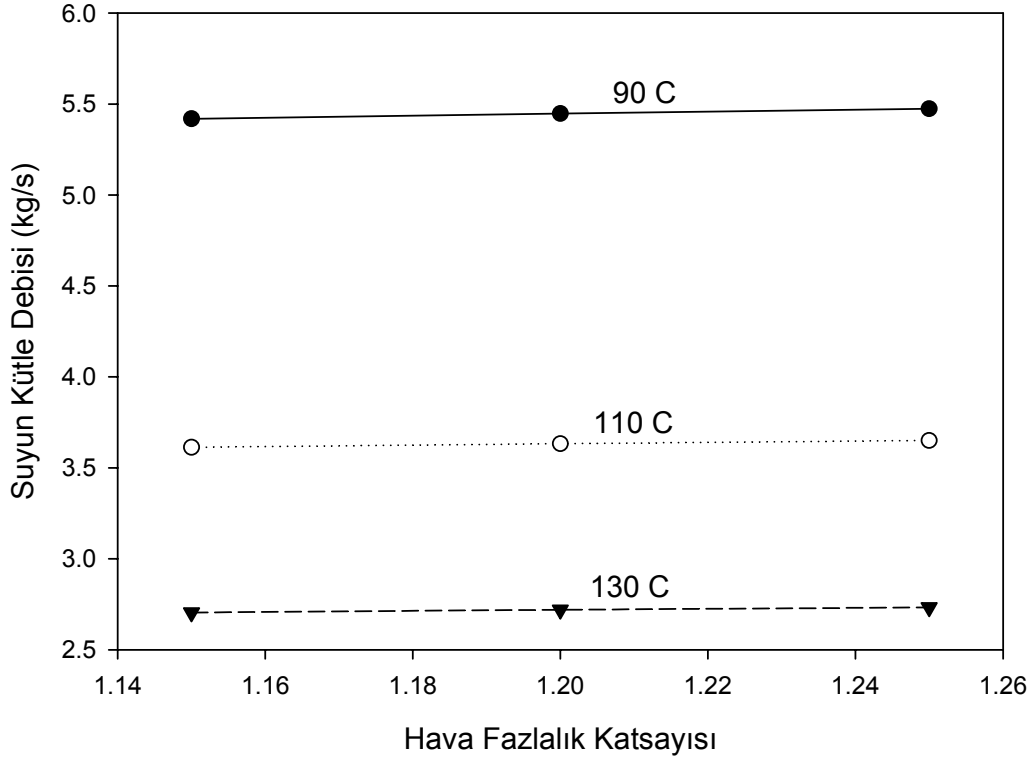
Sıcak su üreten kazanda ise suyun kütle debisinin değişimi aşağıdaki gibi olur.

**Tablo 5.10:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda farklı hava fazlalık katsayıları ve sıcak su çıkış halleri için suyun kütle debisi (kg/s)

| Hava Fazlalık Katsayısı | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
|-------------------------|------|------|------|
| 90°C                    | 5.42 | 5.45 | 5.47 |
| 110°C                   | 3.61 | 3.63 | 3.65 |
| 130°C                   | 2.70 | 2.72 | 2.73 |

Sıcak su çıkışı için elde edilen kütle debileri doymuş buhar çıkışı için elde edilen değerlerden daha yüksektir.

Sıcak su çıkışı hali için suyun kütle debilerinin farklı çıkış halleri ve hava fazlalık katsayıları için değişimi grafiksel olarak şu şekildedir.

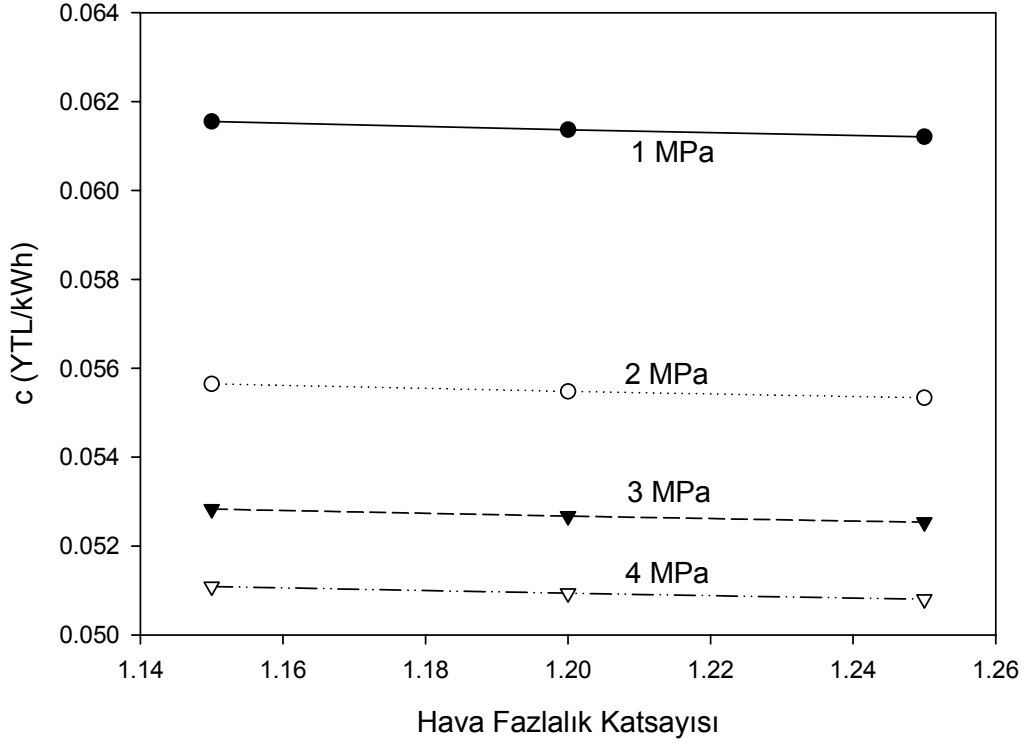


**Şekil 5.8:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için suyun kütle debisinin değişimi

Birim ekserji başına maliyetin hesaplanması 4. bölümde anlatılmıştı. Bu kısımda birim ekserji başına maliyet değerleri kömür yakan kazan için farklı hava fazlalık katsayısı ve doymuş buhar ve sıcak su olarak farklı çıkış halleri için grafiksel olarak verilmiştir.

Kazan içinde Amasra kömürünün yanması durumunda doymuş buhar ve sıcak su çıkışları için birim ekserji başına maliyet şu şekildedir.



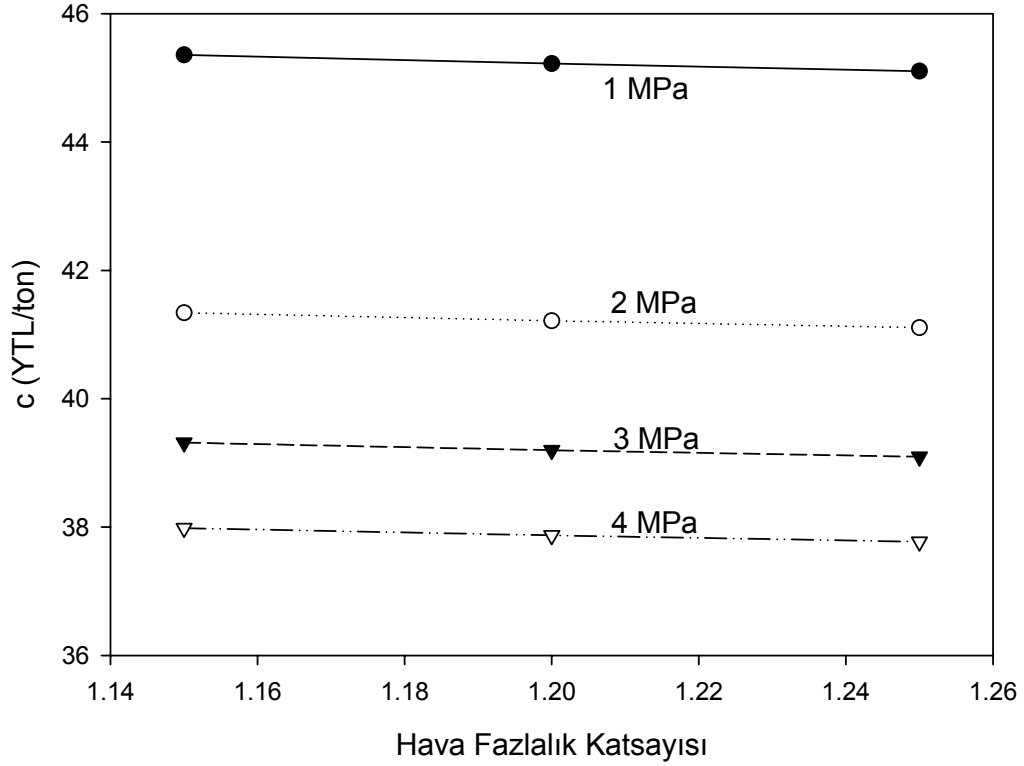


**Şekil 5.9:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için birim ekserji başına maliyet

Amasra kömürü ile yanma durumunda doğalgaz yakmalı kazanda olduğu gibi çıkışta basıncın artışı ile birlikte doymuş buhar için birim ekserji başına maliyet değeri azalır. Bunun nedeni basıncın artışı ile birlikte çıkışta doymuş buharın ekserji değerinin artmasıdır.

Hava fazlalık katsayısının değişimi ile de aynı basınçta birim ekserji başına maliyet değeri azalır. Bunun nedeni önceden de söylendiği gibi hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte kazan içinde aynı basınçta doymuş buharın kütle debisinin artmasıdır. Doymuş buharın kütle debisinin artışı ile aynı basınçta ekserjisi artar ve birim ekserji başına maliyet düşer.

Kazandan doymuş buhar çıkışı için birim ton başına maliyet değeri ise aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



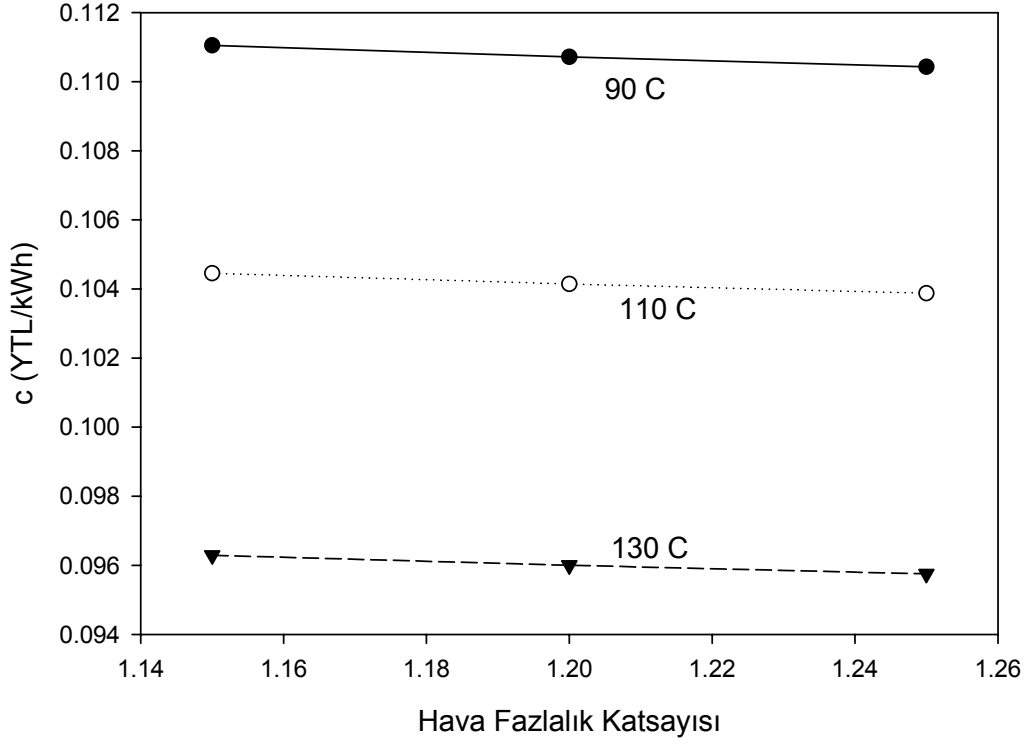
**Şekil 5.10:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda doymuş buhar çıkış hali için birim ton başına maliyet

Kömür yakan kazanda birim ton başına buharın maliyeti doğalgaz yakmalı kazana göre çok daha düşük olur. Bunun en önemli nedenlerinden birisi yakıtın fiyatıdır.

Kömür yakan kazanda da doymuş buhar çıkışı için maliyet yüksektir. Ancak bu maliyet doğalgaz yakmalı kazandan elde edilen maliyet ile kıyaslandığında oldukça düşüktür. Aynı çıkış sıcaklığı için giriş sıcaklığı arttırıldıkça veya suyun giriş ile doymuş buharın çıkışı arasındaki sıcaklık farkı azaltılırsa, buharın ton başına maliyeti düşer.

Kazan içinde yanan kömürün kalitesi düştükçe buharın maliyetinde bir artış meydana gelir.

Kazandan sıcak su çıkışı hali için birim ekserji başına maliyet değeri aşağıdaki gibidir.

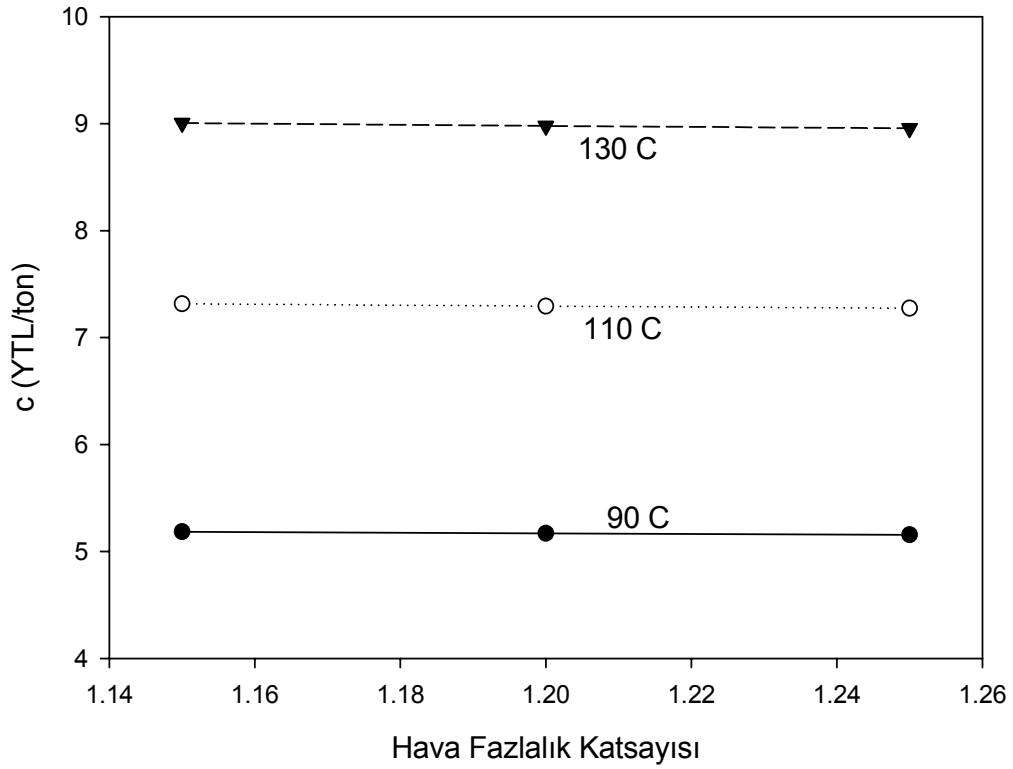


**Şekil 5.11:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için birim ekserji başına maliyet

Şekil 5.11'den de açıkça görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte aynı çıkış sıcaklığında birim ekserji başına maliyet değeri düşer. Çünkü suyun kütle debisi, hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte artar ve böylece çıkışta sıcak suyun ekserjisi artar.

Sıcaklığın artışı ile birlikte birim ekserji başına maliyet değeri azalır. Bu durum da sıcak su çıkışı için ekserji değerinin sıcaklık arttıkça artmasından dolayıdır.

Sıcak su çıkışı için birim ton başına maliyet değeri ise şekil 5.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.12:** Kazanda Amasra kömürü yanması durumunda sıcak su çıkış hali için birim ton başına maliyet

Sıcak su çıkış halinde de doğalgaz kazanındaki gibi sonuçlar geçerlidir. Sıcak suyun maliyeti doymuş buharın maliyeti değerinden daha az olur. Bu durum sıcak su çıkışı için önceden de söylendiği gibi suyun girişi ile sıcak suyun çıkışı arasındaki entalpi farkının doymuş buhar çıkaran kazanda olduğu gibi çok fazla yüksek olmamasından dolayıdır.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada doğalgaz ve kömür yakan kazanlar için eksergoekonomik çözümlene yapılmıştır. İlk olarak termodinamik çözümlene, ardından ekserji ve ekserjiye bağıli ekonomik çözümlene yapılmıştır.

Ekserji çözümlenesi sonucunda doymuş buhar üreten kazandaki tersinmezliğin, sıcak su üreten kazandaki tersinmezlikten daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, sistemin ürettiği doymuş buharın sıcaklığı daha yüksek olduğu için sistem içerisindeki tersinmezlikler azalmaktadır. Ayrıca sıcak su üreten kazanda sıcaklık, doymuş buhar üreten kazanda da basınç arttıkça tersinmezlik azalmaktadır.

Birim ekserji başına maliyet değerlerinin doğalgaz yakan kazanda kömür yakan kazana göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedeni doğalgazın fiyatıdır. Yüksek doğalgaz fiyatı nedeni ile buharın maliyeti doğalgaz kazanında daha yüksek olur. Ayrıca sıcak su üreten kazanda doymuş buhar üreten kazana göre maliyet değeri düşük olur. Bunun nedeni suyun kazana girişi ile sıcak su olarak çıkışı arasında çok fazla sıcaklık farkı olmaması nedeni iledir. Doymuş buhar üreten kazanda da giriş çıkış sıcaklığı arasındaki fark azaldıkça buharın maliyeti düşer.

## KAYNAKLAR

- Basu, P., Kefa, C. and Jestin, L.**, 1999. Boilers and Burners. Springer, Berlin.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M.**, 1996. Thermal Design and Optimization. John Wiley&Sons. USA
- Bilgen, S, Kaygusuz, K., Sari, A.**, 2004. Second Law Analysis of Various Types of Coal and Woody Biomass in Turkey. *Energy Sources*, 26, 1083-1094.
- Borat, O.**, Yanma Stokiyometrisi. 1982. İTÜ Makina Fakütesi Matbaası, İstanbul.
- Çengel, Y. A. and Boles M. A., Çeviren Derbentli, T.**, 1996 Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayıncılık. İstanbul
- Çengel, Y. A., Wood, B., Dinçer, İ.**, 2002. Is Bigger Thermodynamically Better. *Exergy, an International Journal*, 62-68.
- Dinçer, İ., Hussain, M. M., AL-Zaharnah,** 2004. Energy and Exergy Use in Private Public Sector of Suudi Arabia. *Energy Policy*, 32(14), 1615-1624.
- El-Wakil, M. M.**, 1984. Powerplant Technology. Mc Graw Hill. Singapore.
- Genceli, O.**, 1985. Buhar Kazanları. Kiptaş Dağıtımçılık. İstanbul.
- Kakaç, S.**, 1991. Boilers, Evaporators, and Condensers. John Wiley&Sons. Canada.
- Knache, O., Kubaschewski, O., Hesselmann, K.**, 1991, Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Springer-Verlag. Berlin.
- Kotas, T.**, 1995. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger Publishing Company, Florida.
- Küçükçalı, R.**, 2000. Buhar Tesisatı, Isısan Çalışmaları

- Srivastava, A.**, 1988. Second Law (Exergy) Analysis of Various Types of Coal. *Energy Convers. Management*, 28(2), 117-121.
- Tsatsaronis, G.**, 1993. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems. *Prog. Energy Combust, Sci.*, 19, 227-257.
- Wall, G., Gong, M.**, 2001. On Exergy and Sustainable Development-Part 1: Conditions and Concepts. *Exergy, an International Journal*, 217-233.
- Woodruff, E. B., Lammers, H. B., and Lammers, T. F.**, 2005. Steam-Plant Operation. Mc Graw Hill. Newyork.
- Wu, X.**, 2004. Second Law Analysis of Residential Heating Systems, *MSc Thesis*, Concordia University, Canada.
- Ünlü, C.**, 1997. Buhar Tesisatı ve Buhar Cihazları El Kitabı.

## ÖZGEÇMİŞ

Sinan Eren Yalçın 03.05.1980 tarihinde İstanbul'da doğdu. 1991 yılında Bostancı İlkokulunu, 1994 yılında Bostancı Ortaokulunu, 1998 yılında da Haydarpaşa Lisesini bitirdi. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Programını tamamladı. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Isı-Akışkan programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Isı-Akışkan programında yüksek lisans öğrencisi olup tez çalışmasını devam ettirmektedir.

Sinan Eren Yalçın aynı zamanda İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Termodinamik ve Isı Tekniği Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



