

# BUHAR SİSTEMLERİNDE YENİ ENERJİ TASARRUF TEKNOLOJİSİ: TERMOKOMPRESÖR

Onur ÜNLÜ  
Anıl DOĞUŞ  
Mert GÖKKAYA

## ÖZET

Buhar, endüstriyel sanayi kuruluşlarının tamamına yakınında, prosesin temel ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Buhar, yaygın olarak, hızla azalan fosil kaynaklı yakıtlar kullanılarak elde edilmektedir. Fosil yakıtların görünür gelecekte biteceğine ilişkin senaryolar ve global güvenlik riskleri dahilinde her geçen gün artan yakıt fiyatları nedeni ile buharın üretim maliyeti de hızla artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel sanayi kuruluşları, buharın verimli üretimi ve doğru kullanımı konusuna odaklanarak maliyetlerini aşağıya çekmeye çalışmaktadırlar. Buhar tüketimini azaltmanın en önemli yollarından bir tanesi ise düşük basınçlı flaş buharın kullanımının artırılmasıdır. Bu noktada termokompresörler, düşük basınçtaki buharı geri kazanmak için verimli çözüm sunmaktadırlar.

Birçok endüstriyel sanayi kuruluşu düşük basınçtaki buharı, basıncının düşük olması nedeni ile tekrardan prosese yönlendirememekte, dolayısı ile atmosfere atmaktadırlar. Fakat termokompresör teknolojisi ile buharın basıncı ve sıcaklığı kolaylıkla yükseltilebilir ve böylece önceden atmosfere atılan enerjinin tamamı geri kazanılabilir.

Termokompresör, düşük basınçlı buharın yüksek basınçlı buhar kullanılarak sıkıştırılmasını sağlayan ve bunu yapmak için enerji dönüşüm kanunları ile çalışan jet akışkan cihazıdır.

Bu makalede, termokompresörün çalışma prensibi, termodinamik analizi ve sanayideki uygulama alanları üzerine bir çalışma sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Termokompresör, Buhar, Enerji, Tasarruf, Verim

## ABSTRACT

Steam, almost in every industrial company, is consumed as the essential heating source of the processes. Steam is extensively generated by burning rapidly-diminishing fossil fuels. Steam generation cost rises gradually as the scenarios about running out of fossil fuels near future and global security risks that cause fuel prices to increase. Therefore, industrial companies should focus on efficiency of steam generation and proper use of steam in order to reduce their costs down. One of the important ways of reducing the steam consumption is to increase the usage of low pressure flash steam. At this point, thermocompressors provide an efficient solution to recover low pressure steam.

Many industrial companies cannot canalize low pressure steam to processes due to its low pressure and so it's released to atmosphere. However, pressure and temperature of steam can be increased and energy of the steam released to atmosphere can be recovered by thermocompressor technology.

Thermocompressor is a jet fluid device that enables low pressure steam to be compressed by high pressure steam and bases on energy conversion laws.

In this paper, a study upon the working principle, thermodynamic analysis and application areas in industry of thermocompressors are presented.

**Key Words:** Thermocompressor, Steam, Energy, Savings, Efficiency

## 1. GİRİŞ

Sanayi Devriminin kıvılcımını ateşlemiş olan buhar, günümüzde halen çok geniş kullanım alanı bulabilmektedir. Endüstride, elektrik üretimi, ısıtma ve çok çeşitli proseslerde kullanılmak üzere buhardan faydalandığını görebiliriz. Bununla birlikte buhar üretimi, buhar kullanan endüstriyel tesislerin en önemli enerji tüketim kalemini oluşturmaktadır. Dolayısıyla, enerji verimliliği çalışması yapmayı düşünen işletmelerin ilk odaklanması gereken yer buhar tesisatı olmak durumundadır.

Buhar tesisatlarında kullanılan termokompresörler, enerji verimliliği çalışmalarında işletmelere ve mühendislere önemli imkanlar sağlamaktadır. Proseslerden geri dönen yüksek basınçtaki kondensin, atmosfere açık kondens tankına boşaltıldığında bir kısmı buhar fazında atmosfere bırakılmaktadır. Bu durum, işletmeler için büyük bir enerji israfına yol açmaktadır. Atmosfere atılan bu buharı flaş buhar tankı vasıtasıyla sistem içerisinde tutmak mümkündür, fakat yine de basıncı düşük olduğundan proseslerde kullanılamaz. Bu noktada termokompresörler, düşük basınçlı buharın, daha yüksek basınca sıkıştırılarak sistem içerisine geri kazanılabilmesi açısından kritik bir rol oynarlar. Böylece hem düşük basınçtaki atıl buhar sisteme geri kazandırılmış olur hem de sistemin farklı proseslerinin istenilen basınçta buhar ihtiyacı da karşılanmış olur.

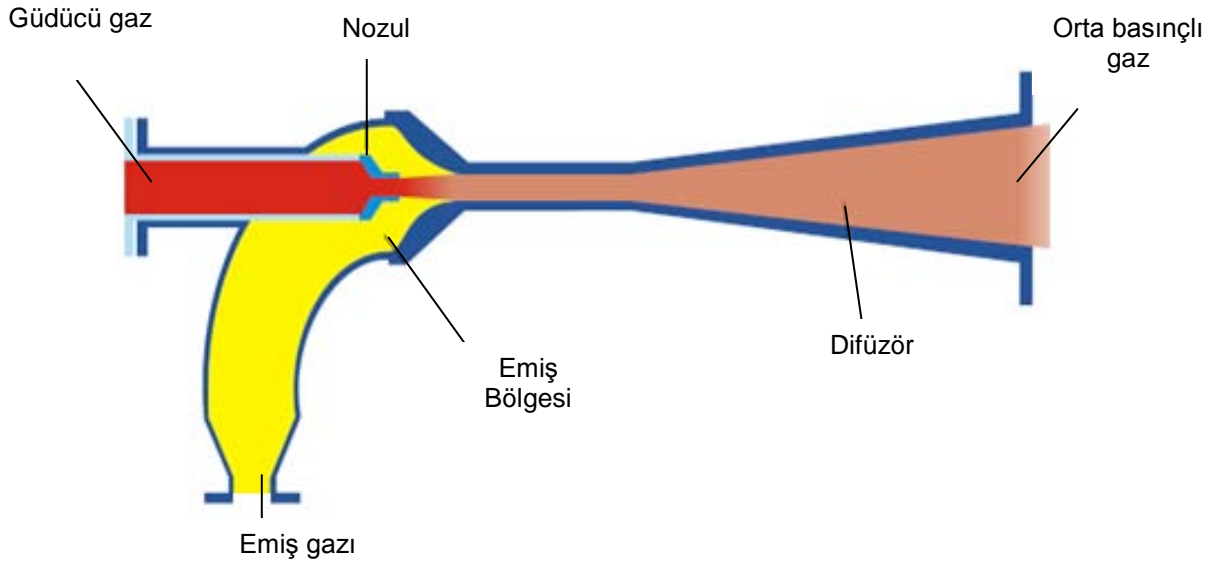
Enerji üretim ve dağıtım sistemlerinde, termokompresörün kullanılıp kullanılmayacağına karar verilirken bazı kısıtlar göz önüne alınmak durumundadır. Termokompresör uygulamasını kısıtlayan bir takım termodinamik ve mekanik şartlar vardır. Bunlar; çıkış kesitindeki debi ve basınç, emme ve yüksek basınçlı buhar giriş kesitindeki buhar debileri ve basınçları şeklinde belirtilebilir. Bu şartlar yerine getirildiğinde, termokompresör sistemleri ile buhar sistemlerinde yüksek miktarda enerji geri kazanımı sağlamak mümkündür.

## 2. TERMOKOMPRESÖR VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Termokompresörler, ejektör sistemlerinin bir üyesidir, aynı fiziksel ve termodinamik esaslara göre çalışmaktadır. Ejektörler, düşük basınçlı akışkanı akışa katmak için yüksek basınçlı akışkan jetinden faydalanan, bu iki akışkanı karıştıran ve düşük basınçlı akışkandan daha yüksek basınçta püskürten cihazlardır. Söz konusu akışkanlar su buharı, hava, gaz gibi çok çeşitli türlerde olabilir [1].

Ejektörler 3 basit bölümden oluşurlar; nozul, emiş bölgesi ve difüzör. Nozul, yüksek basınç ve düşük hızda giren akışkan basıncının düşürülmesini ve yüksek hız değerlerine çıkmasını sağlar, böylece akışkanın kinetik enerjisi artırılır. Emiş bölgesinde, düşük basınçlı akışkan alınarak yüksek basınçlı akışkan ile nozul çıkışında karıştırılması sağlanır. Difüzör ise, kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüştürüldüğü bölümdür.

Termokompresör uygulamalarında ise, her iki akışkan da buhardır. Yüksek basınçlı buharın sahip olduğu enerji, düşük basınçlı buhara transfer edilerek orta basınçlı buhar elde edilmiş olur. Bu cihazlar basit yapılı, kurulumu kolay, yatırım maliyetleri düşük, hareketli parçası bulunmayan dolayısıyla bakım ve işletme masrafları düşük ve uzun ömürlü sistemlerdir. İşletme içerisinde bulunan yüksek performanslı bir termokompresör, düşük basınçlı buharın sisteme geri kazandırılmasını ve bu sayede enerji, su ve suyu şartlandırmak için kullanılan kimyasal israfını önleyerek enerji ve parasal tasarrufu olanaklı kılar.



Şekil 1. Termokompresör [2]

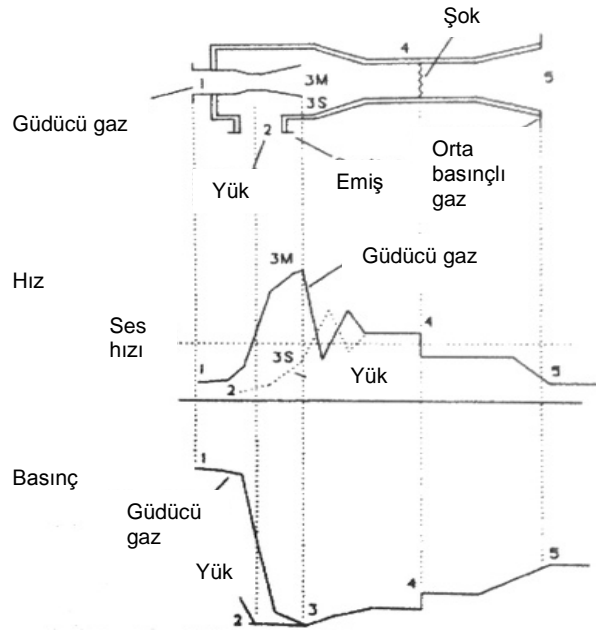
Güdücü gaz yüksek basınçta ( $P_m$ ) kompresöre girer ve nozul içerisinde ilerler. Nozul yüksek basınçlı gazı, vakum oluşturan ve alçak basınçlı ( $P_s$ ) gazın kendisiyle beraber sürüklenmesini sağlayan yüksek hızlı jet akışına dönüştürür. Emiş ve güdücü gazlar gövdede karışır. Daha sonra yakınsak-ıraksak difüzörde, gaz karışımının hız yükü statik yüke dönüştürülür. Böylece orta basınçta ( $P_d$ ) gaz elde edilmiş olur.

### 3. TERMOKOMPRESÖRÜN TERMODİNAMİĞİ VE TASARIM KRİTERLERİ

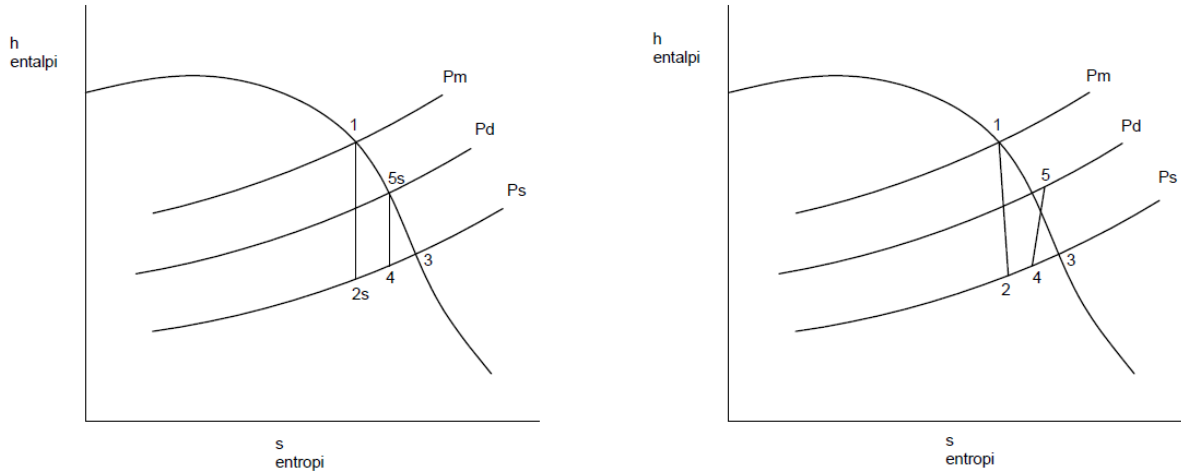
Yüksek basınç ve düşük hızda nozula giren güdücü buharın nozul boyunca hızı artar. Bu bölümde basıncı düşen buharın entalpisi azalır ve basınç enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülür. Nozul çıkışında güdücü buharın hızı ses üstü hızlara ulaşarak, 850-1300 m/s değerlerini alabilir [3]. Emiş tarafından düşük basınçla gelen buhar, nozulun çıkış noktasında güdücü buharla, sabit basınç altında karışır. Bu noktada hızı azalan karışımın entalpisi, karışan buharların debi ve basınç değerlerine bağlı olarak, iki entalpi değeri arasında bir değer alır. Karışım daha sonra, difüzör vasıtasıyla genişletilerek orta basınç ve hız değerinde sisteme gönderilir.

Entalpi-entropi diyagramına bakılırsa (Bknz. Grafik 1), proses şu şekilde ilerlemektedir;

- |          |  |
|----------|--|
| 1 → 2    | Güdücü buharın nozulda genişlemesi                             |
| 2, 3 → 4 | Güdücü buhar (2) ve emiş buharının (3) sabit basınçta karışımı |
| 4 → 5    | Orta basınçlı buharın difüzörde sıkıştırılması                 |



**Şekil 2.** Ejektör Boyunca Hız ve Basınç Profili [1]



**Grafik 1.**(Solda) Entalpi-Entropi Diyagramı (İzantropik Sıkıştırma ve Genişleme)  
(Sağda) Entalpi-Entropi Diyagramı (Gerçekte)

Termokompresör sistemleri, momentum korunumu, enerji korunumu ve süreklilik denklemlerine uyar. Termokompresörde adyabatik ve daimi bir akış için denklemler aşağıdaki gibidir [4];

Süreklilik denklemi;

$$\sum \rho_i V_i A_i = \sum \rho_e V_e A_e \quad (1)$$

Momentum denklemi;

$$P_i A_i + \sum m_i V_i = P_e A_e + \sum m_e V_e \quad (2)$$

Enerjinin korunumu denklemi;

$$\sum m_i (h_i + V_i^2 / 2) = \sum m_e (h_e + V_e^2 / 2) \quad (3)$$

Termokompresörün tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilirken, termodinamik yasalarla beraber dikkate alınması gereken bazı kritik parametreler bulunmaktadır. Bunlar;

1. Karıştırma (karışım) oranı
2. Genişleme oranı
3. Sıkıştırma oranı'dır [3].

Karıştırma oranı, emiş buharının kütleli debisinin ( $M_s$ ) güdücü buharın kütleli debisine ( $M_m$ ) oranıdır ( $M_s/M_m$ ). Yüksek karıştırma oranı, daha fazla alçak basınçlı atıl buharın geri kazanılması anlamına geldiğinden, yüksek performanslı termokompresörlerin karıştırma oranı da yüksektir. Karıştırma oranı, sıkıştırma ve genişleme oranlarına doğrudan bağlıdır ve birçok parametreyle değişmektedir. Termokompresör sistemindeki karşı basınç, kritik değere ulaşana kadar karıştırma oranını çok etkilememekle birlikte, kritik karşı basınç değerinin üzerinde, karıştırma oranında dramatik bir azalma meydana gelir ve termokompresörün performansı azalır. Emiş buharının sıcaklığının artırılması ise, hem karıştırma oranının artmasını sağlar hem de kritik karşı basıncı artırarak, sistemin daha güvenli çalışmasını olanaklı kılar [5].

Genişleme oranı, yüksek basınçlı güdücü buharın mutlak basıncının, emiş buharının mutlak basıncına oranıdır ( $P_m/P_s$ ). Termokompresörden istenilen performansın elde edilebilmesi için, bu oran en az 1.2 olmalıdır [6].

Sıkıştırma oranı, orta basınçtaki karışım buharının mutlak basıncının, düşük basınçlı emiş buharının mutlak basıncına oranıdır ( $P_d/P_s$ ). Termokompresörler sıkıştırma oranı 6:1 değerine kadar ekonomik olarak kullanılabilir [7]. Ancak, güdücü buharın basıncının yüksek olması, aynı sıkıştırma oranı için karıştırma oranını düşürmektedir. Dolayısıyla, gerçekleştirilebilir termokompresör uygulamaları için sıkıştırma oranı 2.5 civarındadır [3].

#### 4. ENDÜSTRİDE TERMOKOMPRESÖR UYGULAMA ALANLARI

Termokompresörler, enerji üretimi ve tüketimi sistemlerinde buhar kullanan çok sayıda endüstriyel işletmede geniş bir kullanım alanına sahiptir. Termokompresör uygulamalarının yapıldığı bazı sektörler;

- Kağıt endüstrisi
- Şeker endüstrisi
- Kojenerasyon sistemleri
- Petro-kimya endüstrisi
- İlaç endüstrisi
- Kimya endüstrisi
- Lastik/kauçuk endüstrisi
- Tekstil endüstrisi
- Gıda endüstrisi

şeklinde örneklendirilebilir.

## 5. ENDÜSTRİDE TERMOKOMPRESÖR UYGULAMASI İLE ENERJİ GERİ KAZANIMI ÖRNEĞİ

Aşağıda gerçek bir endüstriyel işletmede gerçekleştirilen termokompresör uygulaması ile elde edilen enerji geri kazanımı ve parasal tasarruf miktarı verilmiştir.

Söz konusu endüstriyel firmada, buhar kazanında 12 barg işletme basıncında buhar üretilmekte ve bir prosesinde 3,5 barg'de 7.965 kg/h buhar kullanılmaktadır. Bu basınç ve debiyi karşılamak üzere, termokompresör uygulaması öncesi 6.295 kg/h buhar ana buhar hattından basınç düşürücü ile, geri kalan 3,5 barg'deki 1.670 kg/h'lik buhar ise atık ısı kazanında 56.000 Nm<sup>3</sup>/h'lik baca gazı debisinin 180°C'den 157°C'ye düşürülmesi yoluyla elde edilmektedir. Termokompresör uygulaması ile, basınç düşürme işlemi uygulanmadan ve atık ısı kazanında sıcaklık 130°C'ye düşürülerek daha fazla enerji geri kazanımı sağlanmış ve 1 barg basınçta buhar elde edilerek prosesin gerekli basınç ve debideki toplam buhar ihtiyacı karşılanmıştır.

Uygulanan enerji geri kazanım sisteminde termokompresör dizayn parametreleri aşağıdaki gibidir;

Emiş buhar basıncı (P <sub>s</sub> )	: 1 barg
Güdücü buhar basıncı (P <sub>m</sub> )	: 12 barg
Çıkış basıncı (P <sub>d</sub> )	: 3,5 barg
Emiş buhar debisi (M <sub>s</sub> )	: 1.670 kg/h
Çıkış debisi (M <sub>d</sub> )	: 7.965 kg/h
Emiş buhar entalpisi (h <sub>s</sub> )	: 2.706,7 kJ/kg
Güdücü buhar entalpisi (h <sub>m</sub> )	: 2.787,6 kJ/kg
Çıkış buhar entalpisi (h <sub>d</sub> )	: 2.743,7 kJ/kg
Emiş buhar giriş hızı (V <sub>s</sub> )	: 23 m/s
Güdücü buhar giriş hızı (V <sub>m</sub> )	: 30 m/s
Çıkış buhar hızı (V <sub>d</sub> )	: 29,6 m/s

Sistemdeki sıkıştırma ve genişleme oranları aşağıdaki gibi hesaplanır;

Sıkıştırma oranı;

$$P_d / P_s = (3,5+1) / (1+1) = 2,25$$

Genişleme oranı;

$$P_m / P_s = (12+1) / (1+1) = 6,5$$

Süreklilik denkleminde;

$$M_s + M_m = M_d$$

$$1.670 + M_m = M_d$$

Enerjinin korunumu denkleminde;

$$M_s (h_s + V_s^2 / 2) + M_m (h_m + V_m^2 / 2) = M_d (h_d + V_d^2 / 2)$$

$$1.670 (2.706,7 + 23^2 / 2) + M_m (2.787,6 + 30^2 / 2) = (1.670+M_m) (2.743,7 + 29,6^2 / 2)$$

$$M_m = 6.295 \text{ kg/h}$$

$$M_d = 1.670 + 6.295 = 7.965 \text{ kg/h}$$

olarak bulunur.

Termokompresör uygulaması ile baca gazı çıkış sıcaklığı 157°C'den 130°C'ye düşürülmüştür. Bu sayede elde edilen enerji geri kazanımı aşağıdaki gibi hesaplanır;

Baca gazı sıcaklık farkı	: 27°C
Baca gazı özgül ısı	: 0,33 kcal/Nm <sup>3</sup> °C
Baca gazı debisi	: 56.000 Nm <sup>3</sup> /h
Toplam enerji geri kazanımı	: 498.960 kcal/h

Toplam enerji geri kazanımı, doğalgaz yakılarak % 90 verimle yılda 8.640 saat çalışan bir kazanda elde edilmiş olsaydı yıllık parasal tasarruf ve yatırımın geri ödeme süresi aşağıdaki gibi hesaplanır;

Kazan verimi	: % 90
Doğalgaz alt ısı değeri	: 8.250 kcal/m <sup>3</sup>
Yıllık çalışma süresi	: 8.640 saat/yıl
Doğalgaz birim fiyatı	: 0,75 TL/m <sup>3</sup>
Saatlik doğalgaz tasarrufu	: 67,2 m <sup>3</sup> /saat
Yıllık doğalgaz tasarrufu	: 580.608 m <sup>3</sup> /yıl
Yıllık parasal tasarruf	: 435.456 TL/yıl
Termokompresör yatırım maliyeti	: 140.750 TL
Atık ısı kazanı yatırım maliyeti	: 180.000 TL
Toplam yatırım maliyeti	: 320.750 TL
Yatırım geri ödeme süresi	: 8,8 ay

## SONUÇ

Bu çalışmada, termokompresör sisteminin çalışma prensibi ve termodinamik temelleri üzerinde durulmuş, sanayide uygulama alanlarından bahsedilmiş ve gerçek bir endüstriyel tesiste termokompresör uygulaması ile gerçekleştirilen enerji geri kazanımı örneği sunulmuştur. Örnekten de görülebileceği gibi, termokompresör uygulaması ile yüksek oranda yakıt tasarrufu sağlanabilmekte ve amortisman süresi kısa süreli olmakta, bu da termokompresör sistemlerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu bilgiler ışığında, endüstriyel tesiste mevcut düşük basınçlı atıl buhar termokompresör yardımıyla sisteme geri kazandırılarak kullanılabilir buhar haline getirilebilir, artan enerji maliyetleri ve rekabet koşulları karşısında birim ürün başına enerji tüketimi azaltılarak tasarruf sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] POWER, R. B., "Steam Jet Ejectors for the Process Industries", Mc-Graw Hill, New York, S.7-13, 1994.
- [2] FORBES MARSHALL, "Termokompresör Sistemleri Ürün Kataloğu", Erişim tarihi: 07.01.2013, [http://www.forbesmarshall.com/fm\\_micro/downloads/intops/TC.pdf](http://www.forbesmarshall.com/fm_micro/downloads/intops/TC.pdf)
- [3] KUVALEKA, D. K., "Thermocompressors - Boosting Steam to Boost Profits", Paper ASIA, Mart 2007.
- [4] APHORNRATANA, S., "Theoretical Study of a Steam-Ejector Refrigerator", RERIC International Energy Journal, Cilt 18, Sayı 1, Haziran 1996.
- [5] ARIAFAR, K., "Performance Evaluation of a Model Thermocompressor using Computational Fluid Dynamics", International Journal of Mechanics, Sayı 1, Cilt 6, 2012.
- [6] SOUCY, M. & TIMM, G. L., "Thermocompressor Design and Operation for High-Efficiency", Pulp & Paper Canada Magazine, Eylül-Ekim 2010.
- [7] "Use Steam Jet Ejectors or Thermocompressors to Reduce Venting of Low-Pressure Steam", Steam Tip Sheet # 29, US Department of Energy, Erişim tarihi: 10.01.2013, [http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech\\_deployment/pdfs/steam29\\_use\\_steam.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/pdfs/steam29_use_steam.pdf)

## ÖZGEÇMİŞ

### Onur ÜNLÜ

1979 yılı Diyarbakır doğumludur. 2001 yılında YTÜ Makine Fakültesi'nden Makine Mühendisi ünvanı ile mezun olmuştur. Engineering Business Management yüksek lisans eğitimini University Of Warwick'te (İngiltere) 2002 yılında tamamlamış ve Üniversal Makine ve Isı Sanayi Tic. A.Ş. firmasında endüstriyel sistem yatırımları alanında çalışmaya başlamıştır. Halen, kurucu ortağı olduğu ESCON Energy Savings Consultancy firmasında, enerji yatırımı ve geri kazanımı danışmanlığı konusunda endüstriye hizmet vermektedir.

### Anıl DOĞUŞ

1989 yılı Sakarya doğumludur. 2012 yılında İTÜ Makine Fakültesi'nden Makine Mühendisi ünvanı ile mezun olmuştur. Halen, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Isı-Akışkan programında yüksek lisans eğitimine devam etmekte ve ESCON Energy Savings Consultancy firmasında, proje mühendisi olarak çalışmaktadır.

### Mert GÖKKAYA

1989 yılı Edirne doğumludur. 2012 yılında İTÜ Makine Fakültesi'nden Makine Mühendisi ünvanı ile mezun olmuştur. Halen, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Isı-Akışkan programında yüksek lisans eğitimine devam etmekte ve ESCON Energy Savings Consultancy firmasında, proje mühendisi olarak çalışmaktadır.