

Yaşam Alanından Uzak Bölgelerde Enerji Üretimi: Cıvalı Buhar Çevrimi

Ahmet ELBİR^{1*}, İbrahim ÜÇGÜL²

^{1*} Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-8934-7665), ahmetelbir@sdu.edu.tr

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9794-0653), ibrahimucgul@sdu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 24.11.2022 ve Kabul Tarihi 9.02.2023)

(DOI: 10.35354/tbed.1209678)

ATIF/REFERENCE: Elbir, A., Üçgül, İ., (2023). Yaşam Alanından Uzak Bölgelerde Enerji Üretimi: Cıvalı Buhar Çevrimi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13 (1), 18-21.

Öz

Bu çalışmada kombine güç üretim sistemlerinde, termal ısı iletkenliği yüksek olan cıva, çalışma akışkanı olarak seçilmiş ve alt çevrimde H₂O buharı ve R113 akışkanı gibi iki ayrı çevrim kullanılarak cıvalı combine çevrim sistemi tasarlanmıştır. Kurulan sistemde ısı değiştiricilerinde ısı geçişleri eşit, pompa, kompresör ve türbinler izentropik olarak değerlendirilmiştir. Hesaplamalar EES (Engineering Equation Solver) programı ile yapılmıştır. Aşırı ortam ve koşullarda sistem tasarımı için sistemler tek başına ayrı olarak çalıştığında verimler, Cıvalı çevrimde %40, H₂O çevrimde %30 ve R113 çevriminde ise %35 olarak hesaplanmıştır. Kombine güç çevrim verimleri ise cıva-H₂O kombine çevrimi için %58.5 ve cıva-R113 çevriminde ise %61.5 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak yüksek verimli cıvalı combine güç çevrimlerin çöl, dağ, ıssız ada gibi yerleşim yerlerinden uzak bölgelerin enerji üretiminde uygun olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: cıva çevrimi, buhar çevrimi, ORC, R113, enerji analizi

Energy Generation in Remote Areas: The Mercury Vapor Cycle

Abstract

In this study, in combined power generation systems, mercury with high thermal conductivity was chosen as the working fluid and a mercury combined cycle system was designed by using two separate cycles such as H₂O vapor and R113 fluid in the lower cycle. In the installed system, the heat transfers in the heat exchangers were equal, and the pump, compressor and turbines were considered isentropic. Calculations were made with EES (Engineering Equation Solver) program. For system design in extreme environments and conditions, efficiencies have been calculated as 40% in the Mercury cycle, 30% in the H₂O cycle, and 35% in the R113 cycle when the systems operate separately. Combined power cycle efficiencies were found to be 58.5% for the mercury-H₂O combined cycle and 61.5% for the mercury-R113 cycle. As a result, it has been revealed that high-efficiency mercury combined power cycles are suitable for energy production in regions far from settlements such as deserts, mountains, uninhabited islands.

Keywords: mercury cycle, steam cycle, ORC, R113, energy analysis

1. Giriş

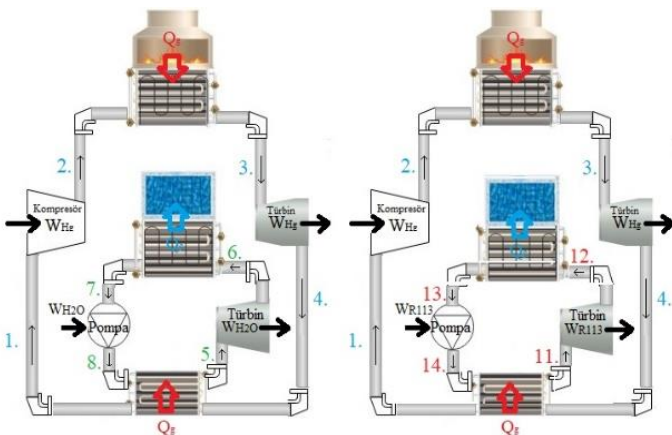
Hem küresel enerji rekabetinin artışı, hem de enerji kaynaklarının tükenme eğiliminde olması, kombine güç çevrimlerinin en alternatif çözüm olarak karşımıza çıkarmıştır. Birçok enerji kaynağı, başta buhar ve gaz türbinlerinden enerji üretimde olmak üzere (güneş, bio-kütle, jeotermal, bio-gaz) birincil kaynak olmuştur. Gelişen teknoloji atık ısıdan yararlanma teknolojilerini geliştirerek kombine sistemlerle alt çevrimler eklenerek enerji sistemlerinin verimini arttırmaya olanak sağlamıştır. Özellikle bu çevrimler güneş kule teknolojisi ve tehlikeli atık giderme sistemleri ile uyumlu teknolojilerdir. Wicks [1], e göre cıvalı bir kombine çevrim santralının ilk patentin 1914 yılında verildiği belirtilmiştir. Genellikle ikili çevrim olarak adlandırılan bir süreçte, cıva yüksek sıcaklıkta çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Üst çevrimde cıva buharı türbinlerini çalıştırdığı vurgulanmıştır. Alt çevrimde ise buhar kullanıldığı belirtilmiştir. Cıva türbini egzozu bir yoğunlaştırıcıya geçireceği ısısının, buhara aktaracak şekilde çalıştığı belirtilmiştir. Sistemin kömür kullanımını yüzde 25 oranında azalttığı belirtilmiştir. Chang, vd. [2], tüm saf metaller arasında en düşük erime noktasına (-38.9 °C) ve (357 °C) kaynama noktasına sahip olan cıva, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan tek saf metal olduğu belirtmiştir. Anonim [3], Cıvanın tek bir çalışma sıvısı olarak kullanılmasının, büyük problemler ortaya çıkardığını belirtmiştir. Geçmişte çalışma akışkanı seçiminde cıva kullanımı ilgi çekici olmamıştır. Bunun sebebi cıvanın hem zehirli hem de pahalı olması bu akışkan ile çalışmalarını engellemiştir. Angelino vd. [4], enerji dönüşümü için buharın yanı sıra yeni bir çalışma sıvısına başvurmanın faydasını ortaya koymuştur. Cıvanın kritik su sıcaklığının oldukça üzerinde, 500 °C civarında bir türbin giriş sıcaklığında orta basınçlı bir tepe çevrimi (örneğin 15 bar) için mevcut en iyi seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, termal verimliliği en üst düzeyde olarak tasarlanmış ve cıvayı çalışma akışkanı olarak kullanılan bu sistemin alt ısı çevrimiyle entegre edilmiştir. Alt çevrim olarak buhar çevrimi ve organik rankine çevrimi ayrı ayrı kullanılmış ve maksimum verimlilik koşulunda enerji analizleri yapılmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Sistem Tanımı

Önerilen sistemin şematik görünümü şekil 1.a ve şekil 1.b de verilmiştir.



Şekil. 1.a cıvalı çevrim-H₂O çevrim

Şekil. 1.b cıvalı çevrim- R113 çevrim

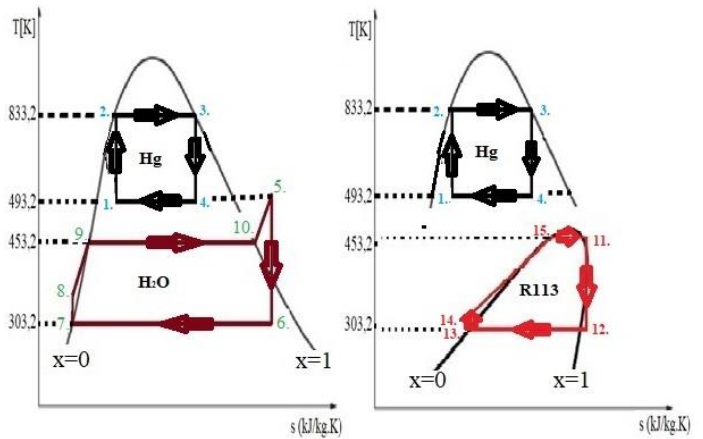
Şekil 1.a ve Şekil 1.b deki çevrimlerde 1., 2., 3., ve 4. Durumlar cıva (Hg) akışkan çevrimini temsil etmektedir. 5., 6., 7., ve 8. durumlar su (H₂O) buharı çevrimini temsil etmektedir. 11., 12., 13., ve 14. Durumlar R113 akışkan çevrimini temsil etmektedir. Sisteme giren ısı Q_g (güneş, bio-kütle, jeotermal, bio-gaz gibi ısının alındığı yüksek sıcaklık sağlayan kaynak) ısı kaynağını, sistemden çekilen ısı Q_c (deniz, akarsu, göl, soğutucu kaynak gibi) ısının atıldığı kaynağı temsil etmektedir.

1. durumdaki sıvı-buhar fazındaki cıva sabit entropi ile sıkıştırılarak 2. Durumuna getirilir, sıktırılmış ve sıcaklığı atmış akışkan ısı kaynağından aldığı ısı ile 3. Durumunda çıkar türbine giriş yapar. 4. Durumunda sabit entropide türbinden çıkan akışkan yoğunlaştırıcıya da ısısını atar ve 5. Durumda tekrar kompresöre girerek çevrimi tamamlar.

Cıvalı-buhar çevrimden alt çevrime (şekil 1.a) aktarılan ısı 5. durumunda buhar çevrimi türbinine kızgın buhar olarak girer. Sabit entropide türbinden 6. Durumunda çıkan akışkan, yoğunlaşma işleminden geçerek yoğunlaştırıcıdan 7. Durumunda çıkar doymuş sıvı olarak çıkar ve ardından sabit entropide pompaya girer, ardından basıncı ve kızgınlık sıcaklığı artırılarak çevrimi tamamlar.

Cıvalı-ORC çevrimden alt çevrime (şekil 1.b) aktarılan ısı 11. durumunda doymuş buhar olarak çıkar ve türbine girer. 12. durumda sabit entropide türbinden çıkar ve yoğunlaşarak 13. durumda doymuş sıvı olarak çıkar. Doymuş sıvı durumundaki akışkan sabit entropide sıkıştırılarak 14. durumda pompadan çıkar. Pompadan çıkan basıncı yükseltilmiş akışkan tekrar cıvalı sistemden ısı olarak çevrimi tamamlar.

2.2. Kombine Güç Çevrimi ve Analizi



Şekil. 2.a cıvalı çevrim-H₂O çevrim

Şekil. 2.b cıvalı çevrim- R113 çevrim

Şekil 2.a ve Şekil 2.b deki sıcaklık/entropi diyagramında akışkanlar için çalışma yönü, süreçleri ve sıcaklıklar verilmiştir.

Buna göre çevrim süreçleri:

- (1-2): cıva sıkıştırma izentropik (kompresör) (Hg)
- (2-3): cıva izobarik ısı girişi (evaporatör) (Hg)
- (3-4): cıva genleşme izentropik (türbin) (Hg)
- (4-1): cıva izobarik ısı çıkışı (kondanser) (Hg)
- (5-6): genleşme izentropik (buhar türbini) (H₂O)
- (6-7): izobarik ısı çıkışı (kondanser) (H₂O)
- (7-8): izentropik sıkıştırma (pompa) (H₂O)

- (8-10): izobarik ısı girişi (evaporatör) (H₂O)
- (10-5): izobarik ısı girişi (aşırı kızdırma) (H₂O)
- (11-12): genleşme izentropik (buhar türbini) (R113)
- (12-13): izobarik ısı çıkışı (kondanser) (R113)
- (13-14): izantropik sıkıştırma (pompa) (R113)
- (14-11): izobarik ısı girişi (evaporatör) (R113)

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum_ç \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2)$$

Burada (2) \dot{Q} ısı aktarım hızı, \dot{W} güç, h özgül entalpi, v hız, z yükseklik ve g yerçekimi ivmesidir.

Cıva-su buharı verimi (3),

$$\eta_{Hg-H_2O} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = 1 - \frac{\dot{Q}_ç}{\dot{Q}_g} = \frac{(\dot{W}_{türb.Hg} - \dot{W}_{komp.Hg}) + (\dot{W}_{türb.H_2O} - \dot{W}_{pomp.H_2O})}{\dot{Q}_{Hg}} \quad (3)$$

Cıva- ORC(R113) verimi (4),

$$\eta_{Hg-R113} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = 1 - \frac{\dot{Q}_ç}{\dot{Q}_g} = \frac{(\dot{W}_{türb.Hg} - \dot{W}_{komp.Hg}) + (\dot{W}_{türb.R113} - \dot{W}_{pomp.R113})}{\dot{Q}_{Hg}} \quad (4)$$

2.3. Kabuller ve sabit parametreler

- Tüm ısı değiştiricilerin (kondanser, evaporatör) ısının tamamını ısı kaynaklarından kayıpsız aktarılmıştır.
- sistemdeki tüm bileşenlerde basınç hattı üzerindeki oluşabilecek basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerjideki değişimler dikkate değer değildir
- Türbin ve pompa verimi izentropik durum olarak alınmıştır.
- Sistem bileşenlerindeki ve boru hattı üzerindeki basınç düşüşleri ve ısı transferi süreci de ihmal edilmiştir.
- Cıvalı sistemde carnot verimi kullanılmıştır.
- Sistem performansı sabit ve düzenli olarak kabul edilmiştir.

3.3. Termodinamik hesaplamalar

Kararlı hal durumunda, kütle dengesi denklemi aşağıdaki gibi verilebilir [5]:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

Burada (1) \dot{m} kütle akış hızıdır, g ve ç indisleri sırasıyla giriş ve çıkış koşullarıdır. Enerji dengesi aşağıdaki denklemde verilir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Şekil 2.a ve şekil 2.b deki her bir noktaya ait termodinamik özellikler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Bileşik sistem için her bir noktanın termodinamik özellikleri.[6]-[7]

Konum	T [K]	s [kJ/kg.K]	P [bar]	h [kJ/kg]	x[kuruluk derecesi]	akışkan
1	493.2	0.5193	0.043	108.6	0.12	Hg
2	833.2	0.5193	15.9	119.9	0	Hg
3	833.2	0.8626	15.9	406	1	Hg
4	493.2	0.8626	0.043	277.9	0.68	Hg
5	493.2	6.792	10.03	2875	-	H ₂ O
6	303.2	6.792	0.04247	2052	0.7929	H ₂ O
7	303.2	0.4368	0.04247	125.7	0	H ₂ O
8	303.2	0.4368	10.03	126.7	-	H ₂ O
9	453.1	2.139	10.03	763.1	0	H ₂ O
10	453.1	6.584	10.03	2777	1	H ₂ O
11	453.2	1.676	20.32	460.9	1	R113
12	303.2	1.676	0.08138	378.2	-	R113
13	303.2	1.095	0.544	227.3	0	R113
14	303.8	1.095	20.32	228.6	-	R113
15	453.2	1.503	20.32	382.4	0	R113

Tablo 2 de kütle ve enerji denklemlerinden elde edilen iş, ısı ve enerji verimleri sunulmuştur.(

Tablo 2. Kütle ve enerji denklemlerinden elde edilen iş, ısı ve enerji verimi

$\dot{W}_{türb.Hg} = 2080$ kW	$\dot{W}_{türb.H_2O} = 823.1$ kW	$\dot{W}_{türb.R113} = 978.1$ kW
$\dot{W}_{komp.Hg} = 183.5$ kW	$\dot{W}_{pomp.H_2O} = 1.003$ kW	$\dot{W}_{pomp.R113} = 15.07$ kW
$\dot{m}_{Hg} = 16.24$ kg/s	$\dot{m}_{H_2O} = 1$ kg/s	$\dot{m}_{R113} = 11.83$ kg/s
$\dot{Q}_{Hg.giren} = 4645$ kW	$\dot{Q}_{H_2O.giren} = 2749$ kW	$\dot{Q}_{R113.giren} = 2749$ kW

$\dot{Q}_{Hg.çıkan} = 2749 \text{ kW}$	$\dot{Q}_{H_2O.çıkan} = 1927 \text{ kW}$	$\dot{Q}_{R113.çıkan} = 1786 \text{ kW}$
$\eta_{Hg} = \%40$	$\eta_{H_2O} = \%30$	$\eta_{R113} = \%35$

4. Sonuç

Bu çalışma, termal iletkenliği yüksek olan cıva ve cıvalı alt çevrimlerin enerji analizini şöyle sunmaktadır:

- Cıvalı çevrim tek başına çalıştığında, 4645kW 'lık ısı girişi ile 1896.5 kW net gücü, 16.24 kg/s kütleli debi ile %40 enerji verimi sağlamıştır.
- H₂O çevrim tek başına çalıştığında, 2749 kW 'lık ısı girişi ile 822.1 kW net gücü, 11.83 kg/s kütleli debi ile %30 enerji verimi sağlamıştır.
- R113 çevrim tek başına çalıştığında, 2749 kW 'lık ısı girişi ile 963.03 kW net gücü, 1 kg/s kütleli debi ile %35 enerji verimi sağlamıştır.
- Kombine güç olarak cıva-H₂O kombine çevrimi enerji verimi %58.5 cıva-R113 çevrimi enerji verimi %61.5 dir.

Sonuçlar, cıvalı sisteme ORC'li alt çevrimler eklenmesiyle daha verimli bir sistem olduğunu gösterdi.

Dünya nüfusundaki hızlı artış, enerji kaynaklarının tükenmesine, çevre kirliliği gibi sorunların artmasına, hammadde kaynaklarının ve değerli tarımsal arazilerinde yok olması gibi birçok sorunu beraberinde getirmiştir. Ayrıca enerji üretim tesislerinin kurulumlarının tarımsal arazilere yapılması dünya ekonomisinin sürdürülebilirliğine büyük zararlar vermiştir. Enerji üretimi için değerli araziler yerine çöl dağ, ıssız adalar gibi insan yaşamayan ve yerleşim yeri bulunmayan (hatta aşırı iklim şartlarında bulunan) yerlerde enerji üretim tesislerinin kurulumunun uygun olduğu sürdürülebilir bir gelecek için ortaya konmuştur. Bu bağlamda cıva combine güç çevrimlerinin aşırı ortam ve koşullara enerji üretiminde kullanılabilmesi dünyanın geleceği açısından önemli alternatif çözümler sunmaktadır.

Kısaltmalar

pomp. : pompa

komp. : kompresör

türb. : türbin

Hg : cıva

η = verim

Kaynakça

[1] Wicks, F. (2015). Mercury and Steam. Mechanical Engineering, 137(07), 40-45.

[2] Chang, T. C., You, S. J., Yu, B. S., Chen, C. M., & Chiu, Y. C. (2009). Treating high-mercury-containing lamps using full-scale thermal desorption technology. Journal of hazardous materials, 162(2-3), 967-972.

[3] Erişim tarihi: 10.09.2022 <http://douglas-self.com/MUSEUM/POWER/mercury/mercury.htm>

[4] Angelino, G., & Invernizzi, C. (2006). Binary and ternary liquid metal—steam cycles for high-efficiency coal power stations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 220(3), 195-205.

[5] Dincer, I., Rosen, M. A., Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Elsevier Science, New York, USA, 2012

[6] Klein SA. Engineering Equation Solver (EES) 2020, F-Chart Software, Version 10.835-3D

[7] Vargaftik, N. B. (1975). Tables on the thermophysical properties of liquids and gases. Hemisphere Pub. Corp..