

ORGANİK RANKİN ÇEVİRİMLİ JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNDE OPTİMAL HAVA SOĞUTMALI YOĞUŞTURUCU BOYUTLANDIRMASI

Reza AGAHI
Claudio SPADACINI
Marco FRASSINETTI
Luca XODO

ÖZET

Yoğuşturucu, organik Rankin çevirimini kullanan jeotermal enerji santrallerinin temel parçalarındandır. Hava soğutmalı yoğuşturucu soğutma suyunun mevcut olmadığı veya su kalitesinin uygun olmadığı durumlarda en uygun seçenektir. Sıcaklığın sıfırın altında bulunduğu soğuk mevsimlerden yararlanmak da hava soğutmalı yoğuşturucu seçimi için diğer bir kıstastır. Çifti çevirimli bir jeotermal enerji santralinde hava soğutmalı yoğuşturucunun tasarım optimizasyonu kritik önem taşır. Yoğuşturucunun bağımsız bir bileşen gibi ele alınmak yerine genel organik Rankin çevirimli sistem optimizasyonu ile birlikte uygulanması gerekir.

Yazarlar bu makalede hava soğutmalı yoğuşturucu optimizasyonu için bir metodoloji sunmaktadırlar. Bu metodoloji, hava soğutmalı yoğuşturucu tasarım parametrelerini değiştirerek jeotermal enerji santralinin performansını değerlendirmek için tescilli bir simülasyon yazılımı kullanılmaktadır. Bu simülasyondan alınan sonuçlar ile ekonomik faktörler, hava soğutmalı yoğuşturucunun en optimal tasarım parametrelerini tespit etmek üzere, mali bir model içinde bir araya getirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankin Çevrimi, Hava soğutmalı yoğuşturucu

ABSTRACT

Condenser is an essential part of geothermal power plants utilizing organic Rankine cycle. Air cooled condenser is an obvious choice when cooling water is not available or water quality is not suitable. Taking advantage of sub zero cold seasons is another criterion for choosing air cooled condensers. Design optimization of an air cooled condenser in a binary cycle geothermal power plant is critical. It should be carried out in combination with overall organic Rankine cycle system optimization rather than treated as an independent component.

In this paper the authors report a methodology for air cooled condenser optimization. The methodology utilizes proprietary simulation software to evaluate geothermal power plant performance with changing the air cooled condenser design parameters. The outputs of the latter simulation and economics factors are combined in a financial model to determine the most optimal air cooled condenser design parameters.

Key Words: Organic Rankine Cycle, Air cooled condenser.

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji santrali projelerinin sayısı ve önemi her geçen gün artmaktadır [1]. Sayı olarak artmaktadır; çünkü yatırımın geri dönüşü oldukça caziptir. Önem kazanmalarının nedeni ise, jeotermal elektrik enerjisinin elektrik üretim şirketleri için yenilenebilir enerji portföyünün daha verimli bir bölümü olmasıdır.

Birçok ülkede jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi için mali teşvikler verilmektedir. Parasal teşvik alması ve baz yük olarak sınıflandırılması, jeotermal elektrik enerjisi üretimi projelerini bağımsız yatırımcılar, elektrik üretimi şirketleri ve bağımsız elektrik üreticileri için cazip hale getirmiştir.

Orta dereceli kaynak sıcaklıklı jeotermal enerji santralleri, düşük entalpi değerinden dolayı doğrudan buhar Rankine çevrimi ile birlikte kullanılamaz ve bu yüzden, bir Organik Rankine Çevirim (ORC) sistemi ile çalışan ikili çevrimden yararlanmaktadır [2]. Çalışma sıvısının, kritik üstü ve kritik altı koşullarda çevrimin termodinamik tasarımının ve çalışma sıvısından enerji özütlemek için türbin tipinin seçimi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmış ve çok sayıda makale yazılmıştır.

ORC sistemli çoğu jeotermal santral, hava soğutmalı yoğuşturucularla (ACC) tasarlanmıştır. Hava soğutmalı yoğuşturucular, kışların soğuk olduğu ve soğuk mevsimin uzun olduğu bölgelerde çok yaygındır. Yazarlara göre, bir jeotermal enerji santralinin optimal performansı için hava soğutmalı yoğuşturucuların termodinamik tasarımını değerlendirmek üzere herhangi bir çalışma veya simülasyon bulunmamaktadır.

Yazarlar bu makalede, ORC sistemi ve hava soğutmalı yoğuşturucularla tasarlanmış bir jeotermal enerji santralini göz önünde bulundurmaktadır. Tüm kaynak verileri sabit tutulacaktır. Tek bağımsız değişken, hava soğutmalı yoğuşturucudaki yoğuşma sıcaklığı olacaktır. Simülasyon sonuçları, santralin mali modelini ilk sermaye yatırımı ve elektrik enerjisinin satışından elde edilen gelir bakımından ele alan optimal bir santral performansı için optimal bir yoğuşma sıcaklığını ve ilgili yoğuşturucu tasarımını verir.

2. ORC SİSTEMLİ JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ

Bu çalışma için bir farazi jeotermal enerji santrali olduğunu varsayıyoruz. Santral, ORC sistemi ile tasarlanmıştır ve sıcak kaynak verileri Tablo 1. Jeotermal Kaynak Verileri. 'de verilmiştir.

Tablo 1. Jeotermal Kaynak Verileri.

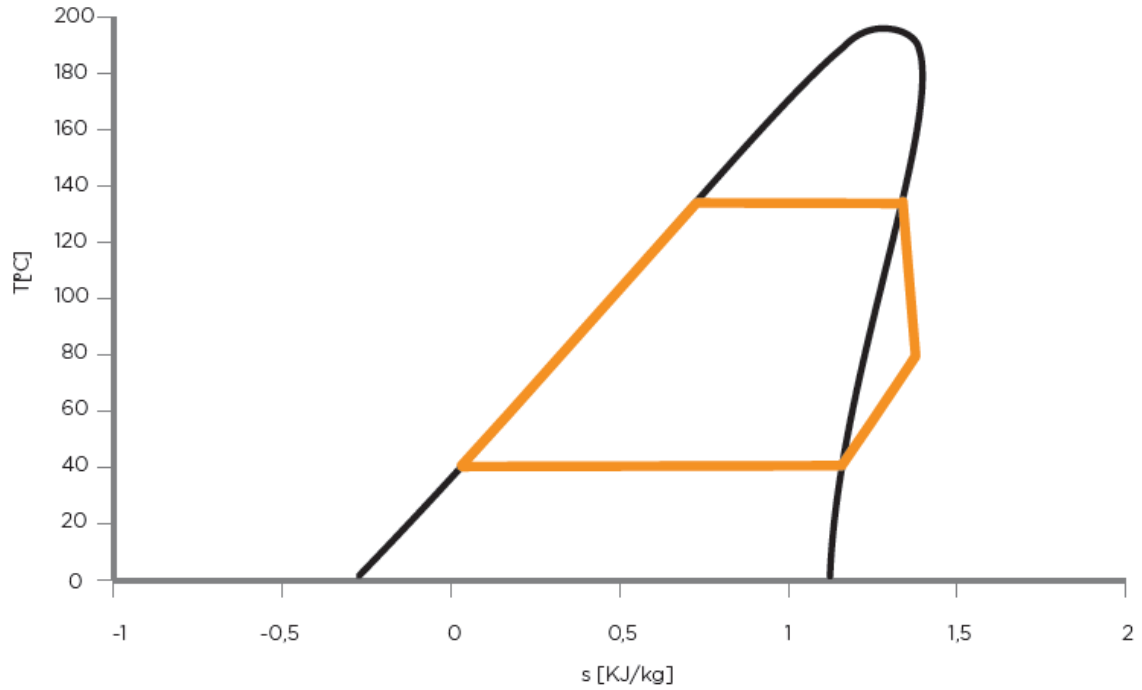
Sıcak Su Giriş Sıcaklığı	160 °C
Sıcak Suyun Kütle Akışı	135 kg/s
Ağırlıkça Tuzluluk	12 %
Sıcak Su Basıncı	8 bar
Reenjeksiyon Sıcaklığı	63 °C
Min. Reenjeksiyon Sıcaklığı	60 °C

Farazi sahanın ortam koşulları Tablo 2. Jeotermal Enerji Santralinin Sahaya İlişkin Ortam Verileri. 'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Jeotermal Enerji Santralinin Sahaya İlişkin Ortam Verileri.

Ortam Sıcaklığı	10 °C
Ortam Nem Oranı	76 %
Ortam Basıncı	0,999 bar (125 m)
Min/Maks. Sıcaklık	-5 / 40 °C
Min/Maks. Bağıl Nem	30 / 95 %
Min/Maks. Ortam Basıncı	0,950 / 1,020 bar

ORC sisteminin çalışma sıvısı olarak ticari dereceli izobütan kullandığını varsayıyoruz. Seçilen çalışma sıvısı, jeotermal kaynak verileri ve ortam koşulları göz önünde bulundurularak, bu santral için Şekil 1'deki T-S diyagramı geliştirilmiştir [3].

**Şekil 1.** ORC Sistemli Farazi Jeotermal Enerji Santrali İçin T-S Diyagramı.

ORC sistemi, içeri akışlı radyal türbin ve turbo genişletirici ile birlikte tasarlanmıştır[4]. Ayrıca, genişletiricinin değişken girişli kılavuz vanalarla donatıldığı varsayılır. Tablo 3, ORC sisteminin detaylarını göstermektedir.

Tablo 3. ORC Sistemi Tasarım Verileri.

ORC Sıvısı	İzobütan
İzobütan Kritik Sıcaklığı	136 °C
İzobütan Kritik Basıncı	36,85 bar a
ORC Kütle Akışı	110 kg/s
Isı Eşanjörlerinin Sıcak Su Tarafı Basıncı	Min. 15 bar a
Yoğuşma Sıcaklığı	30 °C
Türbin Giriş Basıncı	31 bar a
Türbin İzantropik Verimi	86 %
Soğutucu Akışkan Pompası İzantropik Verimi	68%

Santralin ön çevrim tasarımı bazlı brüt ve net enerji üretimi aşağıda gösterilmiştir:

2.1. Enerji Santrali Performansı

Tasarım:

Jeneratör terminallerinde brüt enerji	7,400 KW
Yardımcı donanımın enerji tüketimi	1,550 KW

Kış Mevsimi:

Jeneratör terminallerinde brüt enerji	8,100 KW
---------------------------------------	----------

Yaz Mevsimi:

Jeneratör terminallerinde brüt enerji	4,650 KW
---------------------------------------	----------

Yukarıdaki performans değerlendirmesinde, hava soğutmalı yoğuşturucuda 30 °C'lik yoğuşma sıcaklığı varsayılmıştır.

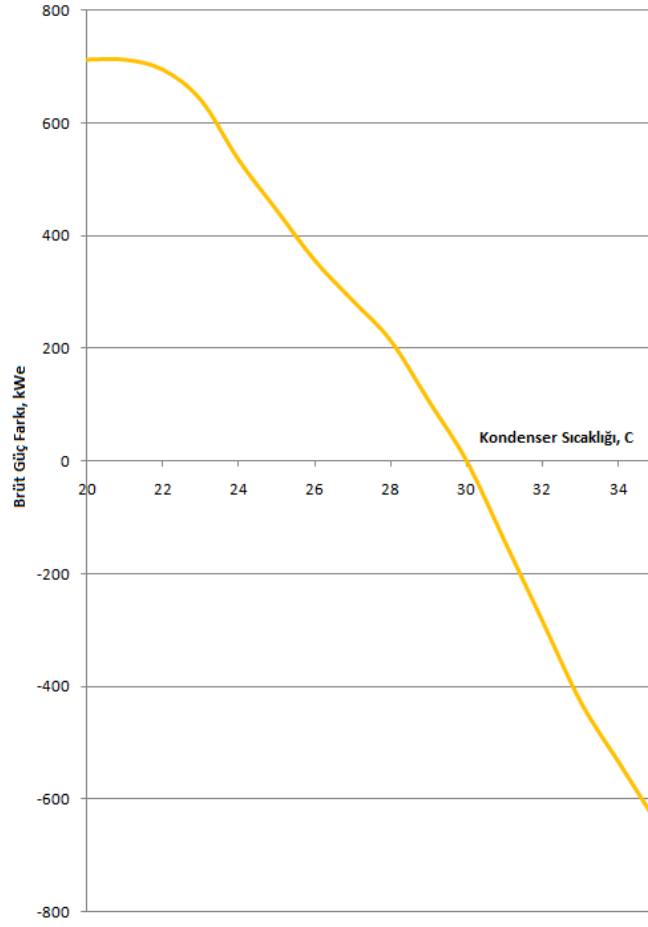
2.2. ORC Çevrimi Simülasyonu

Bu bölümde, 20°C ila 35°C arasındaki yoğuşma sıcaklık aralığı için ORC sisteminin performansını ve özellikle santralin net elektrik üretimini değerlendirmek üzere tescilli bir ORC sistemini kullandık. Bu simülasyonu gerçekleştirmek için santralin 20 yıllık bir hizmet süresinin olduğunu, ilave yük elektrik satın alım fiyatının 70 €/MWh olduğunu ve üretilen elektriğin satış fiyatının 200 €/MWh olduğunu varsaydık.

Hava soğutmalı yoğuşturucuların tasarımı, benzer alan modülleriyle aynıdır. Soğutma kapasitesini artırmak için daha fazla modül eklenmiştir. Ayrıca, fanlar için değişken frekanslı sürücüler takılarak soğutma kapasitesinde ilave bir esneklik sağlanmıştır.

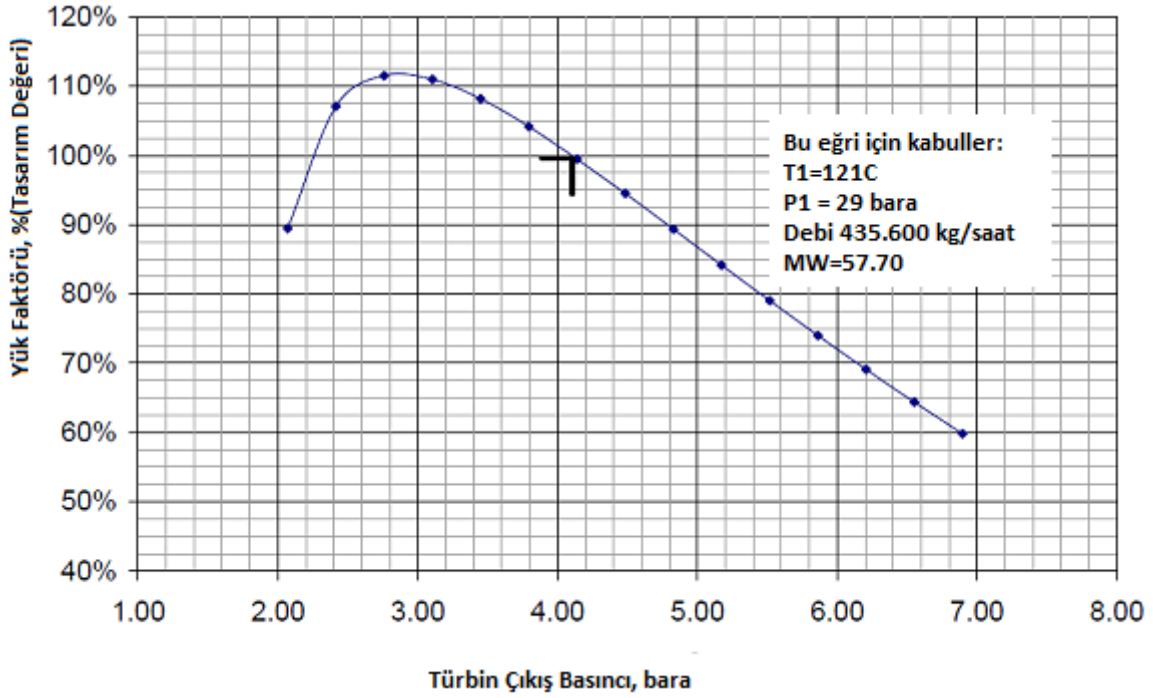
Yukarıdaki tasarım özellikleri, ORC sisteminin bir yoğuşma sıcaklığı aralığını göz önünde bulundurmasını sağlar. Şekil 2 seçilen hava soğutmalı yoğuşturucu ile olası tahliye sıcaklığı aralığını ve santral tarafından üretilen enerji üzerindeki etkisini göstermektedir. En büyük değişimin, yoğuşma sıcaklığının farazi ilk tasarımı civarındaki dar bir sıcaklık aralığında olması dikkate değerdir.

Radyal içeri akışlı turbo genleştirici, tahliye hacimsel debisine duyarlıdır. Limit, radyal çarkın çıkışındaki tahliye debisinin hızı ses hızına yaklaştığı noktadır.



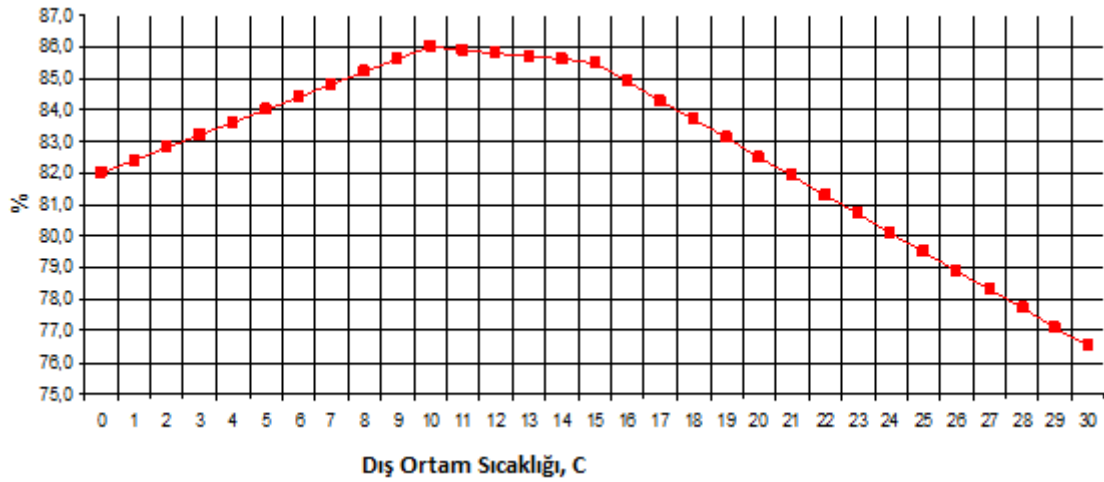
Şekil 2. Ortam Sıcaklığına Karşı Turbo Genleştirici Güç Farkı.

Şekil 3 tahliye basıncına göre genleştirici gücünü gösterir. Yoğuşturucu basıncı düşükçe genleştirici gücünün tasarım değerin yaklaşık %125'ine kadar artabileceği görülmektedir: Bu etki, Şekil 2'deki eğrinin sol üst köşesinde görülebilir; burada brüt güç artışının, yoğuşma sıcaklığıyla gittikçe daha az doğrusal olduğu kanıtlanmaktadır. Yoğuşturucu sıcaklığında ve basıncında (örn; genleştirici tahliye basıncı) daha fazla düşüş olduğunda verim düşecektir. Bu ikinci özellik, genleştirici tasarımıyla bağlantılı birbirini etkileyen birkaç çalışma faktöründen kaynaklanır.



Şekil 3. Geri Basınca Karşı Turbo Genleştirici.

Diğer yandan genleştiricinin verimi, tasarım akışıyla kıyaslandığında bir hacimsel akış işlevidir. O halde genleştiricinin hacimsel akışı, ortam sıcaklığına (ACC'nin belli bir tasarımında); dolayısıyla da yoğuşma basıncına bağlı olan tahliye basıncının bir işlevidir. Değerlendirilen ortam sıcaklığı aralığı göz önünde bulundurulduğunda ortam sıcaklığına (dolayısıyla da, yoğuşma sıcaklığına ve basıncına) karşı genleştiricinin izoentropik verimini gösterir (Şekil 4).

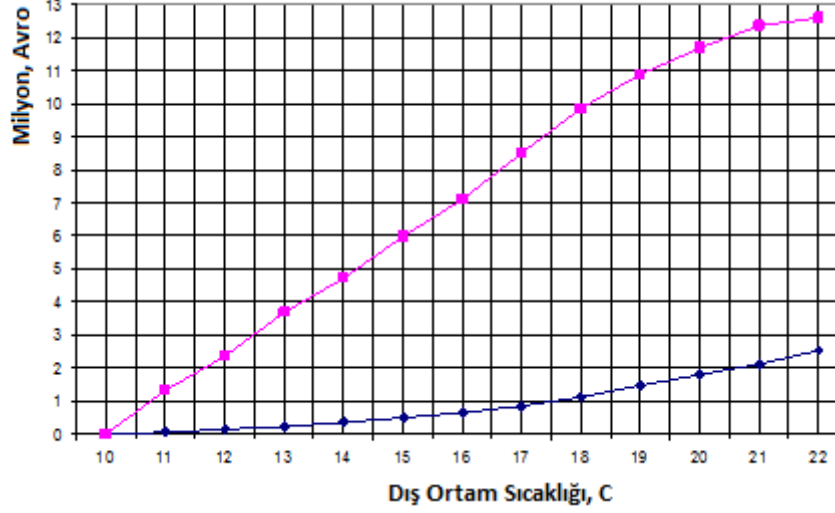


Şekil 4. Ortam Sıcaklığına Karşı Turbo Genleştirici İzoentropik Verimi.

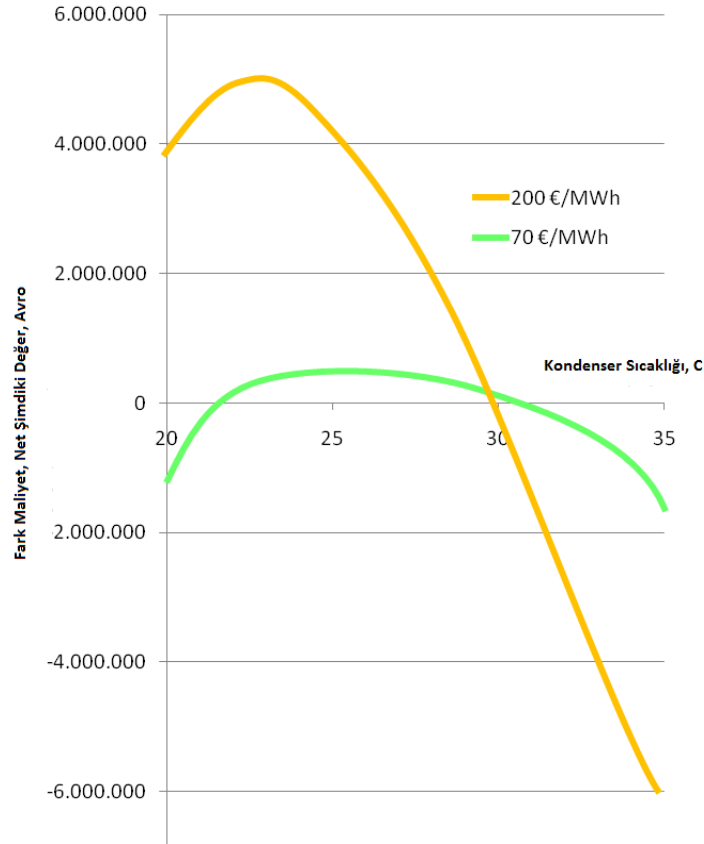
2.3 Hava Yoğuşturucunun Optimizasyonu

ORC sistemli bir jeotermal enerji santralindeki bir hava soğutmalı yoğuşturucunun maliyeti, tüm sistemin toplam maliyetinin önemli bir yüzdesini oluşturur. Bu değer, toplam yatırımın %20-30'udur. Bu yüzden, daha fazla özen gerektirir ve dolayısıyla da, tek bir bileşenin optimizasyonu yerine tüm sistemde optimizasyon yapılmalıdır. Bu çalışmada, 10°C'de hava soğutmalı yoğuşturucu için temel

tasarım özelliklerini seçilmiştir: Daha yüksek ortam sıcaklıkları daha büyük boyutlu turbo genleştirici gerektirir; daha fazla tüketim ve dolayısıyla da, daha düşük toplam performans ve yüksek maliyet ile sonuçlanır. Şekil 5, ortam sıcaklığının ORC santralinin yatırımı üzerindeki etkisini ve 20 yıllık süre içinde toplam geri dönüşü gösterir. Şekil 5, NPV'deki tüm mali değerleriyle birlikte bu simülasyonun sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 5. Ortam Sıcaklığının İşlevi Olarak Farazi ORC Santraline Yapılan Yatırım (Alttaki Eğeri İlave Yatırım, Üsteki Eğeri Ek Kazaç Değerleridir)



Şekil 6. Ortam Sıcaklığına Göre Ek Maliyet ve Ek Fayda.

Bu simülasyonun sonraki adımı, hava soğutmalı yoğuşturucunun yetersiz kapasitesinden dolayı fırsat kaybını ve bir kez tasarlanan ortam sıcaklığı için hava soğutmalı yoğuşturucu kapasitesini artırmak üzere yapılacak ek yatırım maliyetini göz önünde bulundurmaktır.

10°C'lik bir ortam sıcaklığında, santralin en ekonomik performansını elde etmek için, elektrik enerjisi üretimi üzerindeki etkilerine göre yoğuşturma sıcaklığının optimizasyonu (yoğuşturucu boyutu ve maliyeti) gerçekleştirilmiştir.

Bu değerlendirme optimum bir aralık sunar. Bu aralık, büyük oranda Şekil 6'da gösterilen elektrik fiyatına/maliyetine bağlıdır. 200 € /MWh'lik teşvik ile, yaklaşık 22–23°C (ortam sıcaklığının 12–13°C üstünde) olan optimum bir noktanın var olduğu açıkça görülmektedir. Yüksek elektrik fiyatı nedeniyle, eğrinin tepe noktası çok keskin bir şekilde fırlamıştır ve mümkün olduğunca fazla miktarda elektrik üretmek çok daha ekonomiktir. Düşük elektrik fiyatı durumunda, optimum bir noktanın (ve, böylece ACC konfigürasyonunun) belirlenmesi, imkansız değilse de zordur. İkinci durumda, 23–28°C'lik optimal bir aralık belirlenebilir.

SONUÇLAR

Jeotermal enerji geri kazanımı her geçen gün daha fazla yaygınlaşmakta ve ekonomik hale gelmektedir. Jeotermal enerji santrali projelerinde artış olmaktadır. Neredeyse tüm elektrik enerjisi hizmeti sunan şirketlerin yenilenebilir enerji portföylerinin büyük bir kısmında jeotermal enerji bulunmaktadır.

Organik Rankine Çevriminden yararlanan jeotermal enerji projeleri dünyanın dört bir yanında faaliyettedir. Çalışma sıvısını, türbin tiplerini ve ORC sisteminin termodinamiklerini değerlendirmek için çok sayıda çalışma ve proje bulunmaktadır. Mevcut çalışma, hava soğutmalı yoğuşturucu tasarımının enerji santralinin elektrik üretimi üzerindeki etkilerini göstermekte ve hava soğutmalı yoğuşturucunun tasarım koşullarını optimize etmek için bir yöntem sunmaktadır. Önerilen yöntem, projenin mali boyutunu içerir ve dolayısıyla sonuç, maliyet-fayda analizi bakımından optimal bir çözümdür.

KAYNAKLAR

- [1] IEA, International Energy Agency, 2008. Key world energy statistics. IEA
- [2] Di PIPPO, R., 2008. Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- [3] Di PIPPO, R., 2004. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. Geothermics 33, 565-586
- [4] MACCHI, E., 1985. Design limits, basic parameter selection and optimization methods in turbomachinery design. NATO ASI Series, Series E: Applied sciences – No. 97B, vol.2. Martinus Nijhoff Publishers.

ÖZGEÇMİŞ

Reza AGAHI

Reza Agahi, Atlas Copco Petrol ve Proses Bölümü'nün jeotermal ve atık sıcaklık enerji geri kazanımı konularında tüm dünyada iş geliştirmeden sorumlu Pazarlama Müdürü'dür. Turbo genleştirici tasarımında ve uygulamalarında 30 yılı aşkın deneyime sahiptir. Güney California üniversitelerinde ders vermiş ve sistem mühendisliği, genleştirici uygulamaları ve enerji geri kazanımı konularında 40'ı

aşkın makale ve tebliğ yazmıştır. Dr. Agahi birçok Rotoflow genişletirici patentinin sahibi veya ortak sahibidir. Reza Agahi Tahran Üniversitesinden B.S. ve M.S. (makina mühendisliği, 1968) ve University of Southern California'dan da Ph.D. (Yöneylem Araştırma ve Sistem Mühendisliği, 1977) diplomalarına hak kazanmıştır.

Atlas Copco Comptec 119 Mosaic Irvine CA 92603, USA, reza.agahi@us.atlascopco.com

Claudio SPADACINI

İtalyan Meccaferreri Grubunun ORC teknoloji çözümleri konusunda uzmanlaşmış bir şirketi olan EXERGY'nin kurucusu ve CEO'sudur.

Makina Mühendisliği dalında Politecnico di Milano'da elde ettiği Master's diplomasından sonra - ORC çevirimi ve organik akışkanların termal dengesi konulu tezi ile akademik yılın en iyi öğrencisi sıfatıyla "Premio Sesini" ödülünü kazanmıştır. Spadacini bundan önce bir İsviçre şirketi olan THERMOSELECT'in CTOsu olarak çalışmış ve sistem mühendisliği ve enerji geri kazanımı uygulamaları konusunda yaklaşık 10 makale ve yazı hazırlamıştır. Claudio Spadacini bugün ANIMP (Associazione Nazionale Impiantisti) Enerji Komitesinin üyesi olup ORC çevirimi için bir simülasyon yazılımı geliştirmiştir.

Yenilenebilir enerji ve ısı geri kazanımı teknolojileri alanında 15 yıllık deneyimi ile Spadacini bugün ORC çevirimi optimizasyon tasarımında uzman olarak kabul edilmektedir.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, c.spadacini@exergy.it

Marco FRASSINETTI

EXERGY'de Proje Uygulama Bölümünün başında bulunmaktadır. Politecnico di Milano'dan Master diplomasına hak kazanmıştır.

2007 yılına kadar daha çok GE Nuovo Pignone şirketine alt yüklenici olarak çalışan CTM Ambiente şirketinde Güç Üretimi ve Petrol ve Gaz endüstrisi alanında 7 yıl boyunca Proje Yönetiminde çalışmıştır.

Daha sonraki yıllarda ORMAT ORC sistemleri uygulamalarına odaklanan ICQ Energetica şirketine geçmiştir. Gerek endüstri gerekse yenilenebilir enerji tesislerinde muhtelif ısı geri kazanımı ORC ünitelerinin kurulum ve ilk çalıştırmasının sorumluluğunu üstlenmiştir. Ayrıca uluslararası konferanslarda konuşmacı olarak yer alarak pazarlama ve satış faaliyetlerine de destek vermiştir.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, m.frassinetti@exergy.it

Luca XODO

EXERGY İş Geliştirme Müdürüdür.

Yenilikçi çok hassas Organik Rankine Çevirimi konulu tezi ile Politecnico di Milano'da Enerji Üretimi ve Çevirimi Mühendisliği dalında Master diplomasına ve Cofely – GDF Suez ödülüne hak kazanmıştır. Politecnico di Milano'da şu anda inşaatı süren Enel Ricerca tesisinin konsept tasarımına yol açan ve Geothermics Elsevier hakemli dergisinde yayınlanan bir makaleye ortak yazar olmuştur.

Luca Xodo Eni Kurumsal Üniversitesi, İş İdaresi Enerji Endüstrisi kursu ile Enerji ve Çevre Ekonomisi dalında (MEDEA) Scuola Mattei'de Master diplomasına hak kazanmıştır.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, l.xodo@exergy.it

OPTIMUM AIR COOLED CONDENSER SIZING FOR AN ORGANIC RANKINE CYCLE GEOTHERMAL POWER PLANT

Reza AGAHI
Claudio SPADACINI
Marco FRASSINETTI
Luca XODO

ABSTRACT

Condenser is an essential part of geothermal power plants utilizing organic Rankine cycle. Air cooled condenser is an obvious choice when cooling water is not available or water quality is not suitable. Taking advantage of sub zero cold seasons is another criterion for choosing air cooled condensers. Design optimization of an air cooled condenser in a binary cycle geothermal power plant is critical. It should be carried out in combination with overall organic Rankine cycle system optimization rather than treated as an independent component.

In this paper the authors report a methodology for air cooled condenser optimization. The methodology utilizes proprietary simulation software to evaluate geothermal power plant performance with changing the air cooled condenser design parameters. The outputs of the latter simulation and economics factors are combined in a financial model to determine the most optimal air cooled condenser design parameters.

Key Words: Organic Rankine Cycle, Air cooled condenser.

ÖZET

Yoğuşturucu, organik Rankin çevirimini kullanan jeotermal enerji santrallerinin temel parçalarındandır. Hava soğutmalı yoğuşturucu soğutma suyunun mevcut olmadığı veya su kalitesinin uygun olmadığı durumlarda en uygun seçenektir. Sıcaklığın sıfırın altında bulunduğu soğuk mevsimlerden yararlanmak da hava soğutmalı yoğuşturucu seçimi için diğer bir kısıttır. Çifti çevirimli bir jeotermal enerji santralinde hava soğutmalı yoğuşturucunun tasarım optimizasyonu kritik önem taşır. Yoğuşturucunun bağımsız bir bileşen gibi ele alınmak yerine genel organik Rankin çevirimli sistem optimizasyonu ile birlikte uygulanması gerekir.

Yazarlar bu makalede hava soğutmalı yoğuşturucu optimizasyonu için bir metodoloji sunmaktadırlar. Bu metodoloji, hava soğutmalı yoğuşturucu tasarım parametrelerini değiştirerek jeotermal enerji santralinin performansını değerlendirmek için tescilli bir simülasyon yazılımı kullanılmaktadır. Bu simülasyondan alınan sonuçlar ile ekonomik faktörler, hava soğutmalı yoğuşturucunun en optimal tasarım parametrelerini tespit etmek üzere, mali bir model içinde bir araya getirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankin Çevrimi, Hava soğutmalı yoğuşturucu

1. INTRODUCTION

Geothermal power plant projects are growing in number and importance [1]. They grow in number because return on investment is attractive and gain importance because geothermal electrical energy is a more productive portion of renewable portfolio for electric power utility companies.

There are financial incentives for electrical energy production from geothermal resource in several countries. Monetary incentives and being categorized as base load have made geothermal electrical power production projects attractive to independent investors, electric power utility companies and independent power producers.

Geothermal power plants with medium resource temperature cannot be exploited with direct steam Rankine cycle, because of its low enthalpy value, thus are utilizing binary cycle operating with an Organic Rankine Cycle (ORC) system [2]. There have been numerous studies and a large number of papers discussing selection of working fluid, thermodynamic design of the cycle in super critical or sub critical conditions and type of turbine to extract energy from working fluid.

Many geothermal plants with ORC system are designed with air cooled condensers (ACC). Air cooled condensers are popular in the locations where winters are cold and cold season is long. To the authors' knowledge there have been no studies or simulation to evaluate thermodynamic design of air cooled condensers for an optimal performance of a geothermal power plant.

In this paper, the authors consider a geothermal power plant that is designed with ORC system and air cooled condenser. All resource data will be kept constant. The only independent variable will be condensing temperature in the air cooled condenser. The simulation results provide an optimal condensing temperature and associated condenser design for an optimal performance of the plant considering financial model of the plant in terms of initial capital investment and revenue from selling electrical power.

2. GEOTHERMAL POWER PLANT WITH ORC SYSTEM

We assume a hypothetical geothermal power plant for this study. The plant is designed with ORC system and hot resource data are given in Table 1.

Table 1. Geothermal Resource Data.

Brine Inlet Temperature	160 °C
Brine Mass Flow	135 kg/s
Weight Percentage Salt	12 %
Brine Pressure	8 bar
Re-injection Temperature	63 °C
Min. Re-injection Temperature	60 °C

The ambient conditions for the hypothetical site are shown in Table 2.

Table 2. Ambient Data For The Site Of The Geothermal Power Plant.

Ambient Temperature	10 °C
Ambient Humidity	76 %
Ambient Pressure	0,999 bar (125 m)
Min/Max Temperature	-5 / 40 °C
Min/Max Relative Humidity	30 / 95 %
Min/Max Ambient Pressure	0.950 / 1.020 bar

We assume the ORC system use commercial grade iso-butane as the working fluid. Considering the selected working fluid, geothermal resource data and ambient conditions the T-s diagram in Figure 1 is developed for this plant [3].

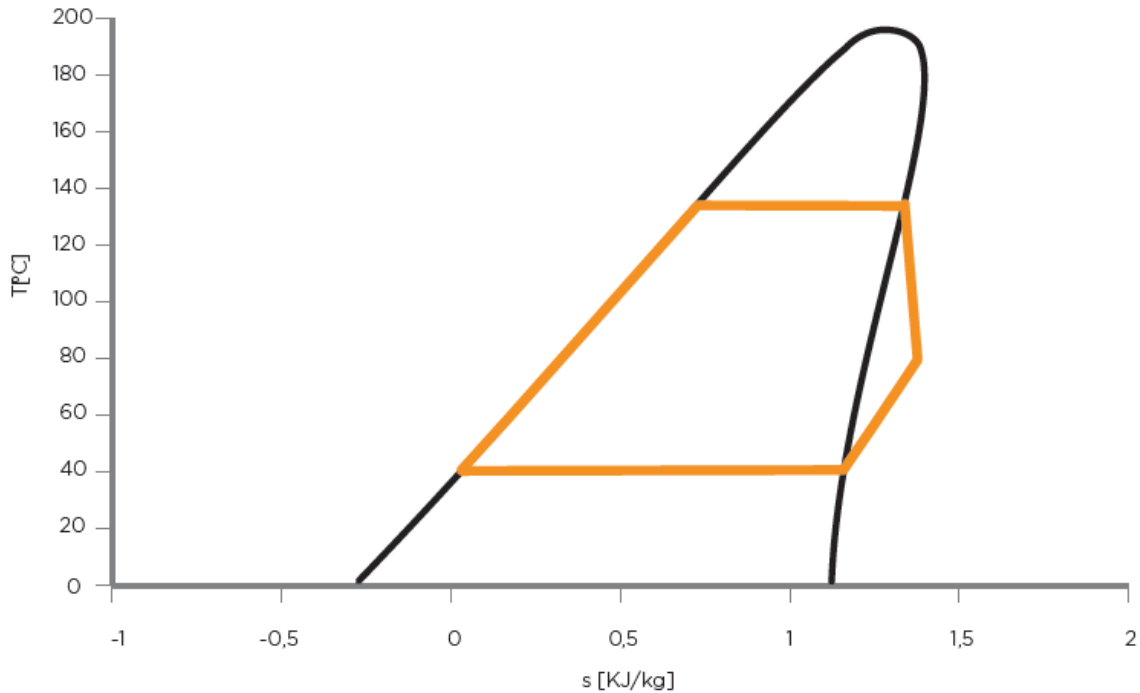


Figure 1. T-s Diagram for a Hypothetical Geothermal Power Plant with ORC System.

The ORC system is designed with inflow radial turbine, turbo expander [4]. Furthermore the expander is assumed to be equipped with variable inlet guide vanes. Table 3 depicts the ORC system details.

Table 3. ORC System Design Data.

ORC Fluid	Iso-butane
Iso-butane Critical Temperature	136 °C
Iso-butane Critical Pressure	36.85 bar a
ORC Mass Flow	110 kg/s
Heat Exchangers Brine side Pressure	Min. 15 bar a
Condensing Temperature	30 °C
Turbine Inlet Pressure	31 bar a
Turbine Isentropic Efficiency	86 %
Refrigerant Pump Isentropic Efficiency	68%

The plant gross and net power production based on the preliminary cycle design is shown below:

2.1. Power Plant Performance

Design:

Gross power at generator terminals	7,400	KW
Auxiliaries equipment power consumption	1,550	KW

Winter Season:

Gross power at generator terminals	8,100	KW
------------------------------------	-------	----

Summer Season:

Gross power at generator terminals	4,650	KW
------------------------------------	-------	----

In the above performance evaluation we assumed the condensing temperature of 30 °C in air cooled condenser.

2.2. ORC Cycle Simulation

In this section we utilize a proprietary ORC system simulation to evaluate ORC system performance and specifically the net electrical output of the plant for a range of condensing temperature from 20 °C to 35 °C. To perform this simulation we assumed that the plant has useful life of 20 years, auxiliary load electricity purchase price is 70 €/MWh and selling price of produced electricity is at 200 €/MWh.

Air cooled condensers' design is modular with similar bay modules. To increase cooling capacity more modules are added. Furthermore there is an additional flexibility in cooling capacity by installing variable frequency drives for fans.

The above design features enable the ORC system to consider a range of condensing temperature.

Figure 2 shows the possible range of discharge temperature with the chosen air cooled condenser, together with its impact on power produced by the plant. It is remarkable that the greatest variation is in a narrow range of temperature around the hypothetical first design of the condensing temperature. Radial inflow turbo expander is sensitive to the discharge volumetric flow. The limit is when velocity of discharging flow through outlet of the radial wheel approaches to speed of sound.

Figure 3 shows expander power with respect to discharge pressure. It is shown that the expander power could be increased with reducing condenser pressure up to about 125% of the design value: this effect could be seen on the top left corner of the curve in

Figure 2, where gross power increase proves to be less and less linear with condensing temperature. There will be diminishing return with further reduction in condenser temperature and pressure, i.e. expander discharge pressure. The latter characteristic is because of several interacting operational factors associated with the expander design.

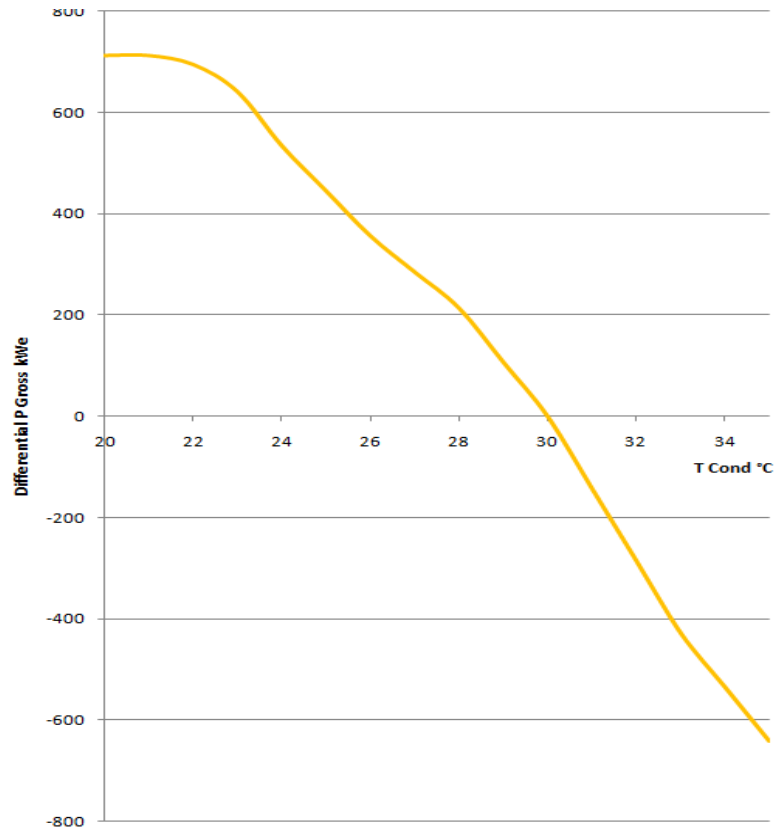


Figure 2. Turbo Expander Back Pressure vs Ambient Temperature.

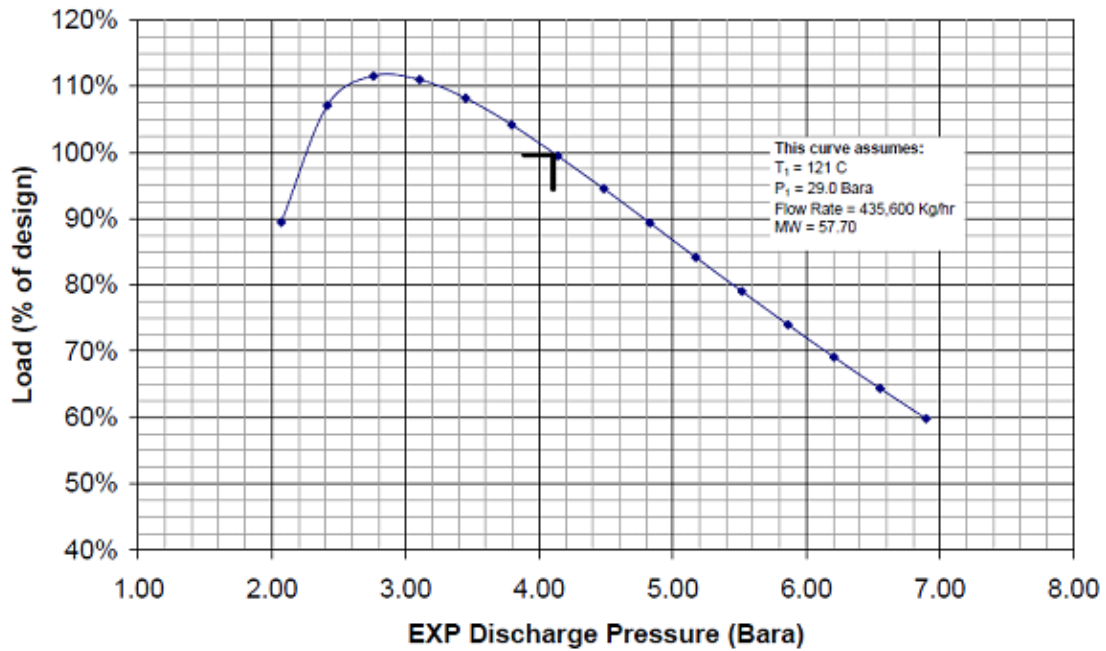


Figure 3. Turbo Expander Power vs Back Pressure.

On the other hand, expander efficiency is a function of volumetric flow compared to the design flow. Expander volumetric flow is in turn a function of the discharge pressure that is depending on the ambient temperature (given a certain design of the ACC) and, thus, condensing pressure. Considering the range of ambient temperature that is evaluated, Figure 4 depicts expander isentropic efficiency versus ambient temperature (and, thus, condensing temperature and pressure).

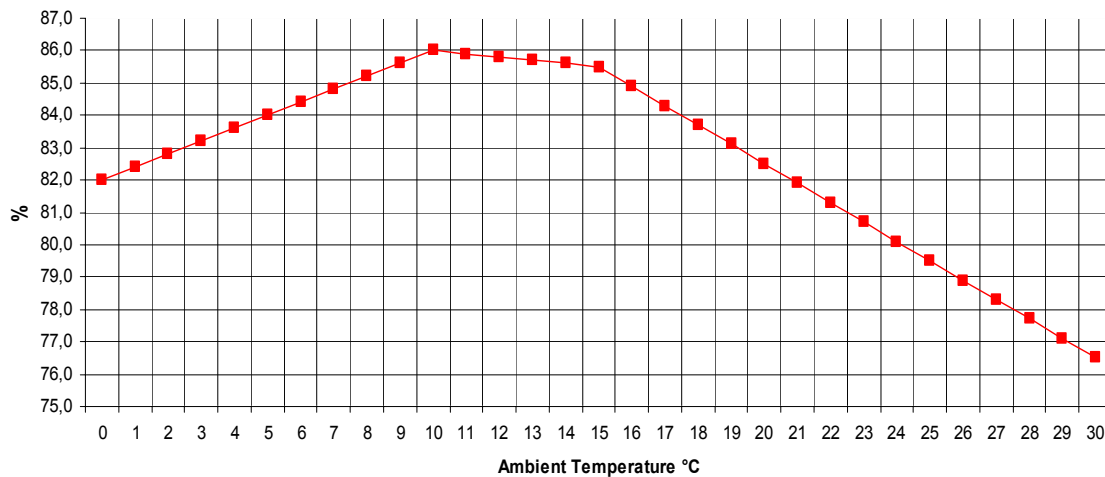


Figure 4. Turbo Expander Isentropic Efficiency vs Ambient Temperature.

2.3. Air condenser optimization

Cost of an air cooled condenser in a geothermal power plant with ORC system is a considerable percentage of the total investment for total system. This value is 20-30% of the total investment. Therefore it deserves more attention and hence its design optimization in the context of total system optimization rather than a single component optimization.

In this study, we chose the base design specification for the air cooled condenser at 10 °C: higher ambient temperatures lead to the need for larger size turbo expander, higher consumption, and thus less overall performances and higher costs. Figure 5 shows the impact of the ambient temperature on ORC plant investment and its cumulative return over 20 years. Figure 5 shows the results of this simulation with all financial values in NPV.

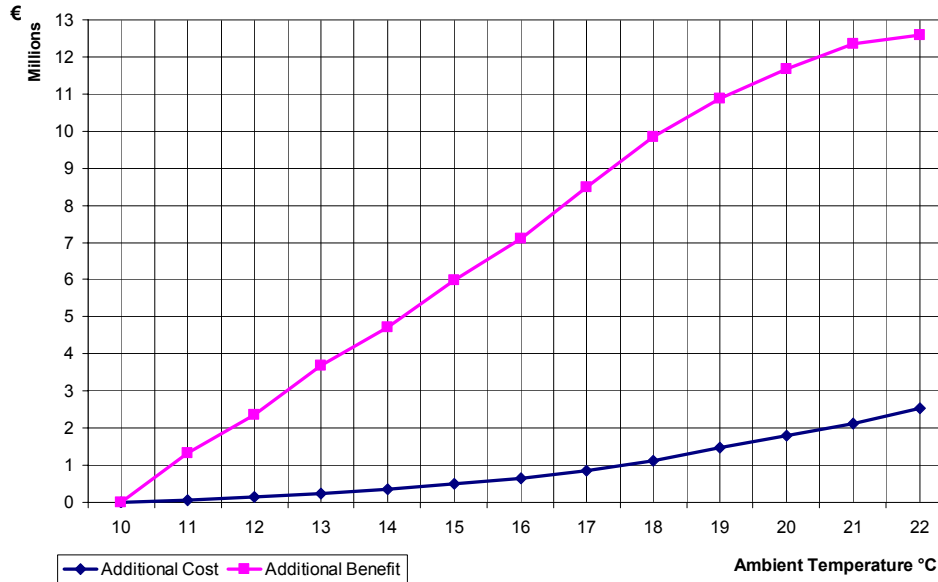


Figure 5. Investment in Hypothetical ORC Plant as Function of Ambient Temperature.

The next step of this simulation is to consider opportunity loss due to insufficient capacity of the air cooled condenser and additional investment cost to include additional air cooled condenser capacity for a single design ambient temperature.

In order to achieve the best economic performance of the plant, given an ambient temperature equal to 10 °C, optimization of condensing temperature (i.e. condenser size and cost) according to its effects on electric power production has been carried out. This evaluation provides an optimum range. This range is heavily dependent on electricity price/cost that is shown in Figure 6. It is clearly shown that with incentives of 200 € /MWh an optimum point exists that is about 22–23 °C (i.e. 12–13 °C above ambient temperature). Thanks to high electricity price, the curve is very sharp peak, and it is much more economical to produce electrical power as much as possible. In case of low electricity price, an optimum point (and, thus, ACC configuration) is difficult, if not impossible, to be identified. In the latter case an optimal range of 23–28 °C could be identified.

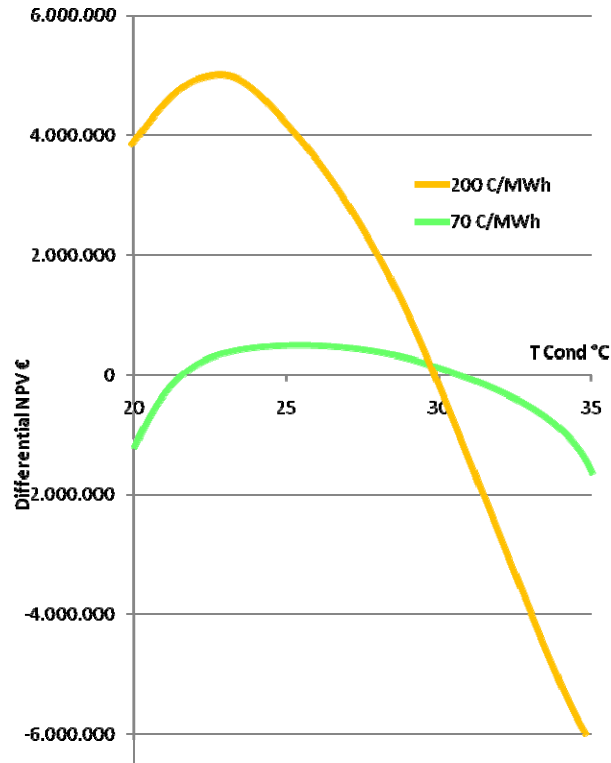


Figure 6. Differential NPV at Different Condensing Temperature.

CONCLUSIONS

Geothermal energy recovery is becoming more and more popular and economical. Geothermal power plant projects are on the rise. Almost all electric power utility companies have geothermal power as a large portion of their renewable energy portfolio.

Geothermal projects utilizing Organic Rankine Cycle are active all around the world. There are many studies and projects to evaluate working fluid, types of turbine and as thermodynamics of the ORC system. The present study presented the impact of air cooled condenser design on power plant electrical output and suggests a method to optimize air cooled condenser design conditions. The suggested method incorporates financial aspect of the project and hence the outcome is an optimal solution in terms of cost-benefit analysis.

REFERENCES

- [1] IEA, International Energy Agency, 2008. Key world energy statistics. IEA
- [2] Di PIPPO, R., 2008. Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- [3] Di PIPPO, R., 2004. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. Geothermics 33, 565-586
- [4] MACCHI, E., 1985. Design limits, basic parameter selection and optimization methods in turbomachinery design. NATO ASI Series, Series E: Applied sciences – No. 97B, vol.2. Martinus Nijhoff Publishers.

BIOGRAPHY

Reza AGAHI

Reza Agahi is Marketing Manager of Atlas Copco, Gas and Process Division and in charge of worldwide business development for geothermal and waste heat energy recovery. He has more than 30 years experience in turbo expander design and its applications. He has taught in universities in Southern California and has authored more than 40 articles and papers in system engineering, expander applications and energy recovery. Dr. Agahi is the inventor or co-inventor of several Rotoflow expander patents. He received B. S. and M. S. (Mechanical Engineering, 1968) from Tehran University and M. S. (Systems Management 1974) and Ph. D. (Operations Research and Systems Engineering, 1977) from University of Southern California.

Atlas Copco Comptec 119 Mosaic Irvine CA 92603, USA, reza.agahi@us.atlascopco.com

Claudio SPADACINI

Claudio Spadacini is founder and CEO of EXERGY, a company specialised in ORC technology solution inside the Italian Maccaferri Group.

After a Master's Degree in Mechanical Engineering at Politecnico di Milano - receiving the 'Premio Sesini' award as best student of the academic year, for a thesis on ORC cycles and thermal stability of organic fluids- he was previously CTO of the Swiss company THERMOSELECT and has authored some 10 articles and papers in system engineering and energy recovery applications. He is today Member of the Energy Committee of ANIMP (Associazione Nazionale Impiantisti) and has developed a simulation software for ORC cycles.

With 15 years' work experience in the field of renewable energy and heat recovery applications, and is today a recognized expert in ORC cycle optimisation and design.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, c.spadacini@exergy.it

Marco FRASSINETTI

Marco Frassinetti is Head of the Project Execution Department at EXERGY. He has a Master's degree in Mechanical Engineering at Politecnico di Milano. He has worked for 7 years on Project Management in Power Generation and Oil & Gas industry, until 2007 for CTM Ambiente, a company mainly working as a sub-contractor for GE Nuovo Pignone.

In the following years he moved to ICQ Energetica, a company focused on application of ORMAT ORC systems. He was responsible for installation and commissioning of several heat recovery ORC units, both in industrial and renewable energy facilities. Moreover he supported marketing and sales activities, also taking part as a speaker in international conferences.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, m.frassinetti@exergy.it

Luca XODO

Luca Xodo is Business Development Manager at EXERGY.

He got a Master's degree in Energy Production and Conversion Engineering at Politecnico di Milano, graduating with a thesis on innovative supercritical Organic Rankine Cycles - awarded by Cofely - GDF Suez prize. He co-authored an article for the peer-reviewed Geothermics Elsevier publication on such work, which gave way to his research activities at Politecnico di Milano on the concept design of the real plant itself, now under construction by Enel Ricerca. He took a Master in Energy and Environment Economics (MEDEA) at Scuola Mattei – Eni Corporate University, Business Administration in Energy Industry course.

Exergy - ORC Srl, Via Cremona, 1 20025 Legnano (MI), Italy, l.xodo@exergy.it