

Termoakustik Isı Pompalarının Distilasyon Kolonlarına Uygulanması

Mesut Bekirogulları^{1*}, Muhammed R. Atelge², Cafer Saka³, Mustafa Kaya¹

¹Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

²Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

³Siirt Üniversitesi Sağlık Meslek Yüksekokulu Siirt, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ / ARTICLE INFO

Geliş Tarihi / Received: 25.09.2018

Kabul Tarihi / Accepted: 03.01.2019

Anahtar Kelimeler:

Isı pompaları

Termoakustik ısı pompaları

Distilasyon

Aspen plus

ÖZET

Isı pompalama teknolojileri distilasyon kolonlarında kullanılan en yaygın enerji tasarruf yöntemlerinden bir tanesidir. Özellikle petrol endüstrisinde çok sayıda ısı pompası konfigürasyonu önerilmiş ve kullanılmıştır. Hali hazırda sıkça kullanılan buhar basınçlı ısı pompalarına alternatif olarak Termoakustik ısı pompaları (TAHP) önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında TAHP verimliliği ve maliyet analizleri yapılmıştır. Termoakustik ısı pompalarının farklı sıcaklıklarda ve sıcaklık yükselmelerindeki doğru analizini yapabilmek için, termoakustik ısı pompaları üç farklı distilasyon kolonuna uygulanmıştır. Bu uygulamalar neticesinde gerekli olan akustik enerjiler, elektrik enerjileri ve gerekli alanlar belirlenmiştir. Termoakustik ısı pompalarının uygulanması sonucu belirlenen işletim maliyetleri, buhar basınçlı ısı pompaları gibi geleneksel ısı pompaları kullanılarak belirlenen işletim maliyetleri ve gerekli soğutma-ısıtma işlemleri için belirlenen maliyetler ile kıyaslanmıştır. Termoakustik ısı pompalarının işletim maliyeti, model kullanılarak belirlenen gerekli enerji ihtiyacı baz alınarak hesaplanmıştır.

Application of Thermoacoustic Heat Pumps to Distillation Columns

ABSTRACT

Heat pumping technologies are one of the main energy saving method used in bulk distillation columns. Espacially in petrochemical industry different configuration of heat pumps have been suggested and applied. Nowadays, thermoacoustic heat pumps (TAHP) have been suggested as an alternative to the widely used compression heat pumps (CHP). In this regard, application of thermoacoustic heat pumps to the distillation columns was studied along with their efficiency and economic. In order to evaluate use of THAP in different temperatures and temperature slopes, it was applied to three different distillation columns. Thanks to this applications the acoustic energy, electrical energy demand and the area requirement were identified. Based on the results obtained from the application of TAHP, the operating cost of TAHP and the cooling-heating costs were compared with the most common conventional heat pump (compression heat pump). The economic analysis was carried out according to energy demand of THAP.

Keywords:

Heat pumps

Thermoacoustic heat pumps

Distillation

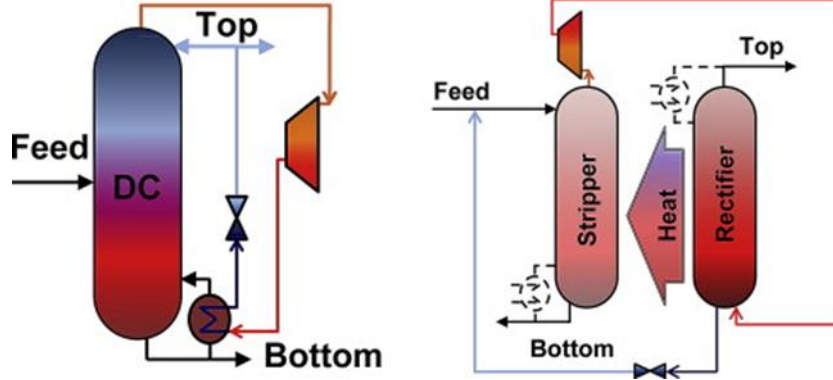
Aspen plus

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: mesutbekirogullari@siirt.edu.tr

1. Giriş

Distilasyon kimya endüstrisinde kullanılan en yaygın ayırma yöntemidir. Bilinen birçok faydasına ve geniş çaplı kullanımına rağmen, yüksek enerji ihtiyacı bu prosesin en büyük problemi olarak kalmıştır. Distilasyon sürecinin işletim maliyetini düşürmek amacıyla, ısı entegrasyonu, ısı pompaları ve termal-çifleşim yöntemi gibi birçok enerji entegrasyonu yöntemi uygulanmıştır (Bruinsma ve Spoelstra, 2010). Isı pompaları Şekil 1'de görüldüğü gibi kondenser'den (Buhar fazı) çıkan suyu tekrar reboiler (Sıvı faz) sıcaklığına pompa yardımıyla yükselterek distilasyon kolonlarının hem soğutma hem de ısıtma gereksinimlerinin belirli bir kısmını karşılamaktadırlar. Isı pompaları teknolojileri, enerji tasarrufu

sağlayan en önemli ısı entegrasyonu metodu olmakla beraber, bu metotta %50'ye varan verimlilik elde edilmiştir (Annakou ve Mizsey, 1995). Ayrıca, ısı pompaları çevreye zarar veren baca gazları emisyonunu azalttıkları için çevre dostu olarak görülmektedirler. Bununla birlikte, distilasyon kolonun çalışma parametreleri ve ısı entegrasyonu teknolojisi parametreleri arasındaki güçlü etkileşimler ısı entegrasyonun uygulamasını sınırlandırmaktadır.



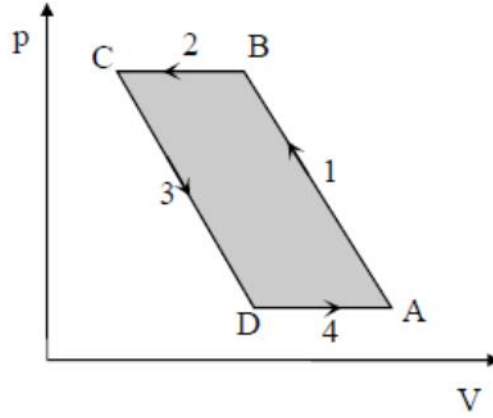
Şekil 1. Isı pompalarının Distilasyon Kolonlarına Uygulanması (Kiss ve Olujic, 2014)

Isı entegrasyonu sistemlerinin distilasyonun kolonlarına uygulanabilmesi için sistemin modifiye edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, enerji tüketiminin azaltılması tek sorun değildir. Değiştirilen sistemin işleyişi ve enerji entegrasyon sisteminin çalışması birlikte ve eş zamanlı olarak incelenmelidir. Tüm bunlar dikkate alındığında yatırım ve işletim maliyetlerini düşürmek ve sistemin düzenli çalışabilmesini hedefleyen çeşitli ısı pompaları teknolojileri distilasyon prosesine eşlik etmek amacıyla dizayn edilmişlerdir. Bu kapsamda Termoakustik ısı pompaları (TAHP) en yeni ısı pompası teknolojilerinden biridir ve bu çalışmanın ana konusudur (Wheatley ve ark., 1985).

Termoakustik ısı pompalarında, düşük sıcaklık kaynağı yüksek sıcaklık kaynağına dönüştürülmek üzere akustik güç ile pompalama işlemi yapılır. Öte yandan konvensiyonel ısı pompalarında ise düşük sıcaklık kaynağı yüksek sıcaklık kaynağına dönüştürülmek üzere elektrik enerjisi kullanılır.

Termoakustik ısı pompalarında akustik güç sayesinde oluşturulan sıcaklık gradyanı ısı enerjisine dönüştürülerek Kondenser'dan çıkan suyun sıcaklığı artırılarak Reboiler sıcaklığına getirilir ve sıcaklığı artırılan su Reboiler'dan tekrar sisteme ilave edilir (Swift, 1988). Bu bağlamda, TAHP döngüsü Brayton döngüsü ile aynı çalışma prensibine sahiptir: iki adiyabatik proses ve iki izobarik proses (Şekil 2). Döngünün başlangıcında (1. adımda), piston kapalı olan uca doğru hareket eder ve ısınan gaz parselini sıkıştırır. 2. adımda gaz parseli yerel çeper sıcaklığından daha sıcaktır ısı gaz parselinden duvara geri dönüşsüz olarak akar. 3. adımda piston geri yönde hareket eder ve gaz parseli genişleyerek soğur. 4. adımda ise gaz parseli yerel çeper sıcaklığından daha soğuktur ve bu sefer duvar çeperinden gaz parseline ısı geçişi olur ve döngü yeniden başlar (Tijani, 2001).

Bu teknoloji henüz yeni olduğu için sistemin verimliliği ve maliyeti hakkında pek fazla bir veri bulunmamaktadır. Bu çalışmada TAHP verimliliği ve maliyet analizlerinin yapılması amaçlanmış olup Tijani ve ark. (2002), lineer termoakustik teorisine dayanan yeni bir dizayn stratejisi kullanılmıştır. Bu strateji termoakustik ısı pompaları (TAHP) sistemlerinin dizaynında ve optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu strateji boyutsuz kantitatif bir model sunarak gerekli olan akustik enerjiyi ve alan gereksinimi tayin etmektedir.



Şekil 2. TAHP'de tipik bir gaz hareketinin basınç hacim diyagramı (Tijani, 2001)

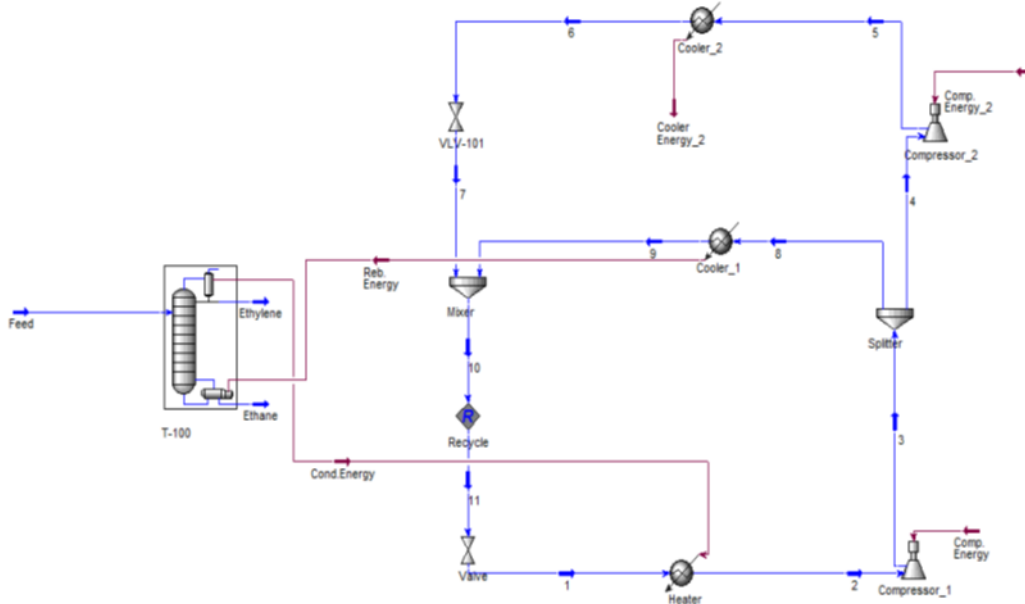
2. Materyal ve Yöntem

TAHP teknolojisinin verimliliğini analiz edebilmek için Şekil 3'te gösterilen proses diyagramı Aspen Hysys (AspenTech, Burlington, MA) kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Öncelikle distilasyon kolonu dizayn edilmiştir. Burada distilasyon kolonunun aktif bir şekilde çalışabilmesi için Tablo 1'de verilen ve kolonuna ait olan üç ayrı distilasyon kolonuna ait olan değerler kullanılmıştır. Burada Toluene-Xylene (T-X) ve Ethylene-Ethane (E-E) distilasyonu için Peng-Robinson ve Methanol-Water (M-W) distilasyonu için General NRTL fluid paketleri seçilmiştir.

Tablo 1. Distilasyon kolonlarının dizaynında kullanılan veriler (Choe ve Luyben, 1987)

Design Specification	Systems		
	Methanol- Water	Toluene- Xylene	Ethylene- Ethane
Feed flow rate g.mol/min	27240	18000	5000
Feed composition	0.5	0.67	0.5
Feed temperature °C	70	95	-7
Feed Pressure mmHg	760	90	22800
Distillate flow rate gmol/min	13620	5934	2500
Distillate composition	0.999	0.999	0.95
Reflux ratio	1.023	1.206	7.32
Number of trays	32	29	47
Feed stage	6	14	25

Yapılan bu simülasyon sayesinde sistemin gerek duyduğu ısıtma ve soğutma ihtiyaçları belirlenmiştir. Daha sonrasında distilasyon kolonunda gerekli olan ısı ihtiyacını karşılamak amacıyla basınçlı ısı pompalarının sisteme entegrasyonları yapılmış olup simülasyon tekrar çalıştırılmıştır. Bu aşamada ısı pompası döngüsünün çalışabilmesi için bir soğutucu gaza ihtiyaç duyulmaktadır. Seçilen soğutucu gazın condenser'dan ısıyı başarılı bir şekilde alıp Reboiler'a transfer edebilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda sistemin çalışma sıcaklıkları dikkate alınarak Water-Methanol ve Toluene-Xylene distilasyonları için n-Butane ve Ethylene-Ethane distilasyonu için ise Propane gazları soğutucu gaz olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Basınçlı ısı pompalarının distilasyon kolonlarına uygulanması

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada TAHP ısı pompalarının distilasyon kolonlarına uygulanabilirliği Aspen Plus programı yardımıyla incelenmiştir. TAHP verimliliğini ve maliyetini analiz edebilmek için hali hazırda kullanılan basınçlı ısı pompalarıyla bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak simülasyonu gerçekleştirilen distilasyon kolonunun çalışma sıcaklıkları ve gerekli olan ısıtma ve soğutma enerji gereksinimleri Tablo 2’de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. Reboiler ve Condenser çalışma sıcaklıkları ve gerekli olan ısıtma ve soğutma enerji gereksinimleri

Örnek	$T_{Reb.}$ (K)	$T_{Cond.}$ (K)	$Q_{Reb.}$ (MW)	$Q_{Cond.}$ (MW)	ΔT_m (K)
M-W	374,5	338	16,71	16,32	36,5
T-X	379,8	321,5	7,12	18,55	58,3
E-E	281	261	0,229	0,224	20

Elde edilen veriler neticesinde TAHP kullanılarak ısıtma ve soğutma işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan alan, akustik güç ve bu akustik gücün elde edilebilmesi için harcanması gereken elektrik gücü hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Isıtma ve soğutma enerji gereksinimlerinin karşılanabilmesi için gerekli olan alan ve akustik güç

Örnek	$Q_{Reb.}$ (10^4 kW)	$Q_{Cond.}$ (10^4 kW)	Alan (m^2)	Yarıçap (m)	Akustik Güç (MW)	Elektrik Enerjisi İhtiyacı (MW)
Water	– 16,71	16,32	2302	27,1	8,34	11,9
Methanol	– 7,12	18,55	3304	32,4	10,00	14,2
Toluene	– 0,229	0,224	466	12,1	1,12	1,6
Xylene						
Ethylene						
Ethane						

Elde edilen TAHP ait verilerin analizini gerçekleştirmek amacıyla basınçlı ısı pompalarında (CHP) dizayn edildi ve sonuçları Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 3’tende görüleceği üzere water-methanol distilasyonu için TAHP kullanılarak distilasyon kolonlarının ısı ihtiyacının giderilebilmesi için gerekli olan enerji 11.85 MW iken CHP kullanılarak aynı işlemin yapılabilmesi için gerekli olan enerji yalnızca 3.21 MW. Toluene – Xylene ve Ethylene – Ethane distilasyonları içinde benzer sonuçlar Tablo 4’te yer

almaktadır. Bu sonuçlar farklı minimum yaklaşım sıcaklıkları (minimum approach temperature) ve basınç değerleri kullanılarak da desteklenmiştir.

Tablo 4. TAHP ve CHP ısı pompalarının enerji ihtiyaçları bakımından karşılaştırılması

Örnek	$Q_{Reb.}$ (MW)	$Q_{Cond.}$ (MW)	TAHP Enerjisi (MW)	Elektrik İhtiyacı	CHP Enerjisi (MW)	Elektrik İhtiyacı
Water – Methanol	16,71	16,32	11,85		3,21	
Toluene – Xylene	7,12	18,55	14,22		5,05	
Ethylene – Ethane	0,229	0,224	1,6		0,40	

TAHP ve CHP sistemlerinin çalışabilmesi için sisteme dışardan enerji verilmesi gerekmektedir. Gerekli olan ısıtma ve soğutma enerjilerinin maliyeti Sinnott ve Towler (2009) tarafından aşağıda önerilen maliyet hesaplama formülüne göre hesaplanmıştır.

$$P_{soğutma,ısıtma} = QS_{min} \cdot P_E \cdot \frac{0,01}{3600}$$

Burada $P_{soğutma,ısıtma}$ sistemin ısıtma veya soğutma maliyeti, QS_{min} minimum ısıtma veya soğutma ihtiyacı ve P_E 1 ton ısıtma veya soğutmanın maliyetidir.

Bu doğrultuda her iki ısı pompası sistemine dışardan verilmesi gereken enerjinin maliyeti hesaplandığında CHP sistemlerinin TAHP oranla 3-4 kat daha az maliyetli olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. TAHP ve CHP ısı pompalarının kullanımının getirmiş olduğu maliyet

Örnek	TAHP (10^6 £/y)	CHP (10^6 £/y)	Ekstra LP+CW (10^6 £/y)	Giderler
Water – Methanol	7,13	1,93	3,47	
Toluene – Xylene	8,56	3,04	1,55	
Ethylene – Ethane	0,96	0,24	-	

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Termoakustik ısı pompalarının distilasyon kolonlarına uygulanabilirliği Aspen Plus kullanılarak incelenmiştir. Sistemin çalışma parametreleri düzenli bir şekilde değiştirilerek sistemin sonuçları analiz edilmiştir. Elde edilen verilere göre termoakustik ısı pompalarının verimliliği buhar basınçlı ısı pompalarından 3-4 kat daha azdır ve bu da dışardan enerji sağlanarak kullanılan buhar basınçlı ısı pompalarına kıyasla, termoakustik ısı pompalarının seçilen distilasyon kolonlarına uygulanmasının hiçbir fayda getirmediğini göstermiştir. Ayrıca bu gerçek termoakustik ve buhar basınçlı ısı pompalarının işletim maliyetlerinin hesaplanmasıyla da desteklenmiştir. Bu çalışmada, çevre sıcaklığı üzerinde dışardan sağlanan ısıtma-soğutma işlemlerinin daha uygun olduğu, çevre sıcaklığının altında ise dışardan ısıtma ve soğutma yapılamayacağı için buhar basınçlı ısı pompalarının kullanımının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Annakou, O., Mizsey, P., 1995. Rigorous investigation of heat pump assisted distillation. *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(3): 241-247.
- Bruinsma, O.S.L., Spoelstra S., 2010. Heat Pumps in Distillation. *Distillation&Absorption Conference*, Eindhoven, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- Choe, Y.S., Luyben, W.L., 1987. Rigorous dynamic models of distillation columns. *Industrial & engineering chemistry research*, 26(10): 2158-2161.
- Kiss, A.A., Olujić, Ž., 2014. A review on process intensification in internally heat-integrated distillation columns. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 86: 125-144.
- Sinnott, R.K., Towler, G., 2009. *Chemical Engineering Design: SI Edition*, Access Online via Elsevier.
- Swift, G.W., 1988. Thermoacoustic engines. *The Journal of the Acoustical Society of America* 84: 1145-1180.

- Tijani, M.E.H., 2001. Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration. *Technische Universiteit Eindhoven* Eindhoven, Netherlands.
- Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H., De Waele, A.T.A.M., 2002. Design of thermoacoustic refrigerators. *Cryogenics*, 42(1): 49-57.
- Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G.W., Migliori, A., 1985. Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines. *American Journal of Physics*, 53(2): 147-162.