

Nükleer Yakıt Zenginleştirme İşleminde Kullanılan Gaz Santrifüj

Yönteminin İncelenmesi

Recep AKKAYA¹, Seyit Rıza TOKGÖZ^{1*}, Elif KEMAH¹

Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya

Received: 01.11.2016; Accepted: 22.11.2016

Özet. Nükleer teknolojiye sahip olmak, günümüz ülkelerinin gelişmişliğinin bir ölçüsü olup, bu çalışmada nükleer reaktörlerde kullanılan yakıtın santrifüj yöntemi ile zenginleştirilmesi incelenmiştir. Santrifüj metodunda ayırıştırma faktörünün hesaplanması, farklı tip santrifüjler' in ayırıştırma iş birimlerinin bulunması ve bunların performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nükleer teknoloji; Santrifüj metodu; Ayırıştırma faktörü; Ayırıştırma iş birimi(SWU)

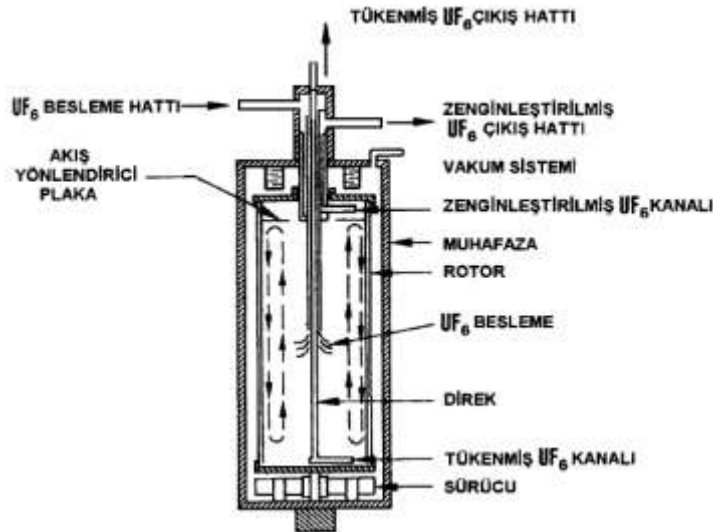
Investigation of Gas Centrifuge Method Used In Nuclear Fuel Enrichment Processing

Abstract. Having nuclear technology is a measure of the development of present-day countries. In this study, the enrichment process of fuel used in nuclear reactors by centrifugation method has been investigated. The centrifugation method has been used to calculate the separation factor, to find the separation units of different types of centrifuges, and their performance has been compared.

Keywords: Nuclear technology, Centrifuge method, Separation factor, Separation work unit (SWU)

1. GİRİŞ

Gaz santrifüj sabit bir açılma hızla kendi eksenini etrafında döndürülen, içi boş dikey bir silindirdir. Santrifüj içerisinde akım girişini ve çıkışını sağlayan çubuklar bulunmaktadır. Bunlar besleme akımının giriş yaptığı, U-235 bakımından zenginleşmiş akımın çıktığı ve fakir akımın çıktığı çubuklardır. Santrifüj 'ün şematik görünümü Şekil.1'de verilmektedir.



Şekil 1. Santrifüjün yapısı [1].

* Corresponding author. Email address: seyitrizatokgoz@gmail.com

Nükleer Yakıt Zenginleştirme

Bir santrifüjde bulunan başlıca parçalar şunlardır: Alt ve üst kepeçler, merkezi direk, üst ve alt süspansiyon sistemleri, elektro-manyetik motor, gövde, moleküler pompa ve kapaklar'dır. Antrifüj metodu ile uranyum hexaflorid (UF_6) içerisinde bulunan $^{238}UF_6$ ve $^{235}UF_6$ molekülleri birbirinden ayrılabilir. Santrifüj yönteminde saflaştırma işlemi UF_6 gazı bulunan silindirik bir ünitenin yüksek hızda döndürülmesi ile oluşmaktadır. Bu silindirik ünitenin içinde konulan UF_6 gazı yüksek hızda döndürülmesi sonucunda ağır olan $^{238}UF_6$ molekülü merkezkaç kuvvetinin büyük olması sebebiyle kenarlarda, daha hafif olan $^{235}UF_6$ molekülü de merkezkaç kuvveti küçük olduğundan ortada birikmektedir. Ağır ve hafif molekülleri ayırtmak maksadı ile tüpler yerleştirilmiş ve bu tüplerden ağır ve hafif moleküller santrifüj 'den ayrılmaktadır.[8]

Santrifüjün dış kısmı ağır olan molekülün merkezkaç kuvvetine karşı dayanıklı olan malzemelerden yapılmıştır. Ayrıca santrifüj yüksek hızlarda döndürüldüğünden, yapı malzemeleri yüksek hızlara karşı korozyonu önleyici dayanıklı ürünlerden imal edilir.

2. AYRIŞTIRMA FAKTÖRÜ

Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle rotor yarıçapı boyunca izotopların bir kısmı ayrılır.

İdeal gaz olarak UF_6 göz önüne alındığında, basınç gradyanı;

$$\left(\frac{dp}{dr}\right) = \left(\frac{M.p}{R.T}\right) \cdot \omega^2 \cdot r \quad (2.1)$$

İfadesiyle verilmekte olup, burada

p basınç, M gazın moleküler ağırlığı, T mutlak sıcaklık, R gaz sabiti, ω dönme açısal frekansı ve r radyal koordinat 'tır.

Yukardaki denklemi düzenlenirse, eksen ile duvar arasındaki basınç oranı;

$$\left(\frac{p(r)}{p(0)}\right) = e^{\left(-\frac{M.\omega^2.r^2}{2.R.T}\right)} \quad (2.2)$$

elde edilir.

M_1 ve M_2 molekül ağırlıklı iki ideal gaz karışımının basınç farkı, denge şartları altında iki molekülün radyal ayrılmasına neden olur. İki gaz arasındaki elementer ayrışma faktörü;

$$\alpha(0) = \left(\frac{x_1(0)}{x_2(0)}\right) / \left(\frac{x_1(r)}{x_2(r)}\right) = e^{[(M_2-M_1).\omega^2.r^2/(2.R.T)]} \quad (2.3)$$

şekilde olup burada x_1 ve x_2 , sırasıyla 1. ve 2. konsantrasyonları ve r ise rotor yarıçapını gösterir.

Bu metotta ayırma faktörü, bileşenlerin molekül ağırlıkları farkının bir fonksiyonudur ve rotorun uçları arasında bir sıcaklık farkı oluşturarak rotor içinde aksel olarak ters yönlü bir gaz akımı sağlanır. Tablo.1' de denklem (2.3) kullanarak UF_6 için farklı hızlardaki ayırma faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo.1 T=310 K için uranyum izotoplarının ayırıştırma faktörleri [8].

<i>Çizgisel Hız (m/sn)</i>	<i>Ayırıştırma faktörü (α)</i>
400	1,097592629
500	1,156616402
600	1,23308399
700	1,329998403
800	1,451325171
900	1,602261816
1000	1,789605833

Yüksek dönme hızlarında büyük ayırma performansı elde edildiği görülmekte, yüksek hızlarda, sabit kepçe önünde şok dalgaları oluşmakta ve bu şok dalgalarla ortaya çıkan sıcaklık, işlem gazının (UF₆) ayrışmasına sebep olmaktadır. Maksimum ayırıştırma faktörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\alpha(max) = \frac{L \cdot \sqrt{2}}{d} \cdot e^{[(M_2 - M_1) \cdot \omega^2 \cdot r^2 / (2 \cdot R \cdot T)]} \quad (2.4)$$

Burada L rotor uzunluğu, M₂ ve M₁ ²³⁵UF₆ ve ²³⁸UF₆ moleküllerinin ağırlıklarını, R gaz sabitini, T sıcaklığı ve d ise santrifüj çapını göstermektedir.[4] Denklem (2.4)'ü kullanarak farklı tip santrifüjler için ayırıştırma faktörleri hesaplanıp grafiği şekil.5'te gösterilmiştir.

3. AYRIŞTIRMA İŞ BİRİMİ:

1941 yılında, Dirac maksimum teorik kapasitede çalışan bir gaz santrifüj için ayırıştırma iş biriminin;

$$\Delta U(max) = \frac{\pi}{2} L \cdot \rho \cdot D \left(\frac{\Delta M v_a^2}{2RT} \right)^2 \quad (3.1)$$

denklemini ile bulanabileceğini göstermiştir.[4]

Burada ΔU ayırıştırma iş birimi (SWU/yıl), L rotor uzunluğu (m), ρ gazın yoğunluğu, D öz difüzyon katsayısı, ΔM molekül ağırlıklarının farkı (0,003kg/mol), R gaz sabiti (8,314 j/mol.K), T sıcaklık (°K) ve v_a hız (m/sn) göstermektedir. Tablo 2'de rotor uzunluğu L=1,5 m olan bir santrifüjün T=300 K'de farklı hız değerleri için ayırıştırma iş birimleri gösterilmiştir. (300 K'de UF₆ için ρ.D=2,3.10⁻⁵ kg UF₆/m.s).

Tablo 2. Farklı hız değerlerine göre ayırıştırma iş birimi değerleri

<i>V_a (m/sn)</i>	<i>U Ayırıştırma iş birimi (SWU/yr)</i>
400	15,8236079
500	38,63185521
600	80,10701497
700	148,408135
800	253,1777263
900	405,5417633
1000	618,1096834

Nükleer Yakıt Zenginleştirme

Tablo 2' de görüldüğü gibi ayrıştırma iş birimi hızın artması ile parabolik bir artış göstermektedir. Yüksek seviyelerde SWU/yıl elde etmek için santrifüj yüksek hızlarla döndürülür. Bu sebeple yüksek hıza dayanıklı santrifüjler (AC100 gibi) tasarlanmıştır.

3.1. AC100 (Amerikan Modeli)

AC100 Amerikan santrifüj tipidir. Rotor kısmı karbon fiber 'den yapılmıştır. AC100 tasarımı, Rus ve Avrupa santrifüj tasarımlarının aksine, daha büyük santrifüjlerin dizilerinden oluşmaktadır. Çapı 60 cm ve boyu ise 12 m uzunluğundadır. Rotor hızı 900 m/s ye kadar çıkmaktadır. 30 yıllık ömre sahiptir. AC 100 santrifüjü dünyanın en gelişmiş ve verimli santrifüjüdür. AC100 yılda 340 SWU 'u aşan bir ayrıştırma performansına sahiptir. Ortalama yılda 340 SWU performansında çalıştırılırsa, her kuyruk yılda 245,000 SWU 'den fazla kapasitede ve 16 kuyruk yılda toplam 3.700.000 SWU ' den fazla kapasiteye sahip olur. Bu üretim seviyeleri ABD ulusal güvenlik amaçları ve ABD ve dünya çapında ticari nükleer güç reaktörleri için gerekli zenginleştirilmiş uranyumu sağlayabilir. [5, 7] Tablo, 3'te farklı hızlarda AC100 santrifüjü için ayrıştırma faktörü ve ayrıştırma iş birimleri verilmiştir.

Tablo 3. AC100 için farklı hız değerlerine göre ayrıştırma faktörü ve ayrıştırma iş birimi.

Hız (m/s)	$\alpha_{(max.)}$	Sıcaklık (K)	ΔU (SWU/yıl)
300	29,85736177	300	40,05350762
400	31,14111904	300	126,5888636
500	32,8730993	300	309,0548427
600	35,12131281	300	640,8561219
700	37,97733482	300	1187,265084
800	41,56252065	300	2025,421817
900	46,03656654	300	3244,334117
1000	51,60925931	300	4944,877484

Tablo 3' te görüldüğü gibi ayrıştırma faktörü ve ayrıştırma iş birimi hızın artması ile artmıştır.

AC100 tipi santrifüjlerde yüksek seviyelerde SWU elde etmek için santrifüj boylarını yüksek tutulup (~12 m) hızları arttırılmıştır.

3.2. TC-21(Avrupa Tipi)

URENCO tarafından tasarlanmıştır. Karbon fiber rotorludur. Çapı 20 cm olup boyu 5 m'dir. Ayrıştırma gücü 100 SWU/yıl civarındadır[5]. Denklem (2,4) ve denklem (3,1)'i kullanarak TC-21 türü bir santrifüj için farklı hızlarda ayrıştırma faktörü ve SWU ayrıştırma iş birimini hesaplanıp tablo 4' te gösterilmiştir.

Tablo 4. TC-21 için farklı hız değerlerine göre ayrıştırma faktörü ve ayrıştırma iş birimi

Hız (m/s)	$a_{(max.)}$	Sıcaklık (K)	ΔU (SWU/yıl)
300	37,32170221	300	16,68896151
400	38,9263988	300	52,74535983
500	41,09137412	300	128,7728511
600	43,90164102	300	267,0233841
700	47,47166852	300	494,6937849
800	51,95315081	300	843,9257572
900	57,54570817	300	1351,805882
1000	64,51157414	300	2060,365618

3.3. TC-12 (Avrupa Tipi)

URENCO tarafından tasarlanmıştır. Karbon fiber rotorludur. Çapı 20 cm ve boyu ise 3 m'dir. TC-12 dördüncü nesil santrifüj' dür ve ayırıştırma gücü 40 SWU/yıl civarındadır [5]. TC-12 santrifüjü için hıza bağlı ayırıştırma faktörü ve ayırıştırma iş birim değişimi tablo 5' te gösterilmiştir.

Tablo 5. TC-12 için farklı hız değerlerine göre ayırıştırma faktörü ve ayırıştırma iş birimi.

<i>Hız (m/s)</i>	<i>a (max.)</i>	<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>ΔU (SWU/yıl)</i>
200	21,72969157	300	1,977950993
300	22,39302133	300	10,0133769
400	23,35583928	300	31,6472159
500	24,65482447	300	77,26371068
600	26,34098461	300	160,2140305
700	28,48300111	300	296,816271
800	31,17189048	300	506,3554543
900	34,5274249	300	811,0835292

3.4. Rus tipi santrifüj

Rus gaz santrifüj tasarımları TENEX tarafından yapılmıştır. Bu santrifüj zenginleştirme işleminde yaklaşım: basit, küçük santrifüjler ve büyük dizilimler olmuştur. Çapı 12-16 cm olup boyu ise 60-70 cm'dir. [3,9] Tablo 6' da Rus tipi santrifüj için ayırıştırma iş birimi ve ayırıştırma faktörü verilmiştir.

Tablo 6. Rus tipi santrifüj için farklı hız değerlerine göre ayırıştırma faktörü ve ayırıştırma iş birimi.

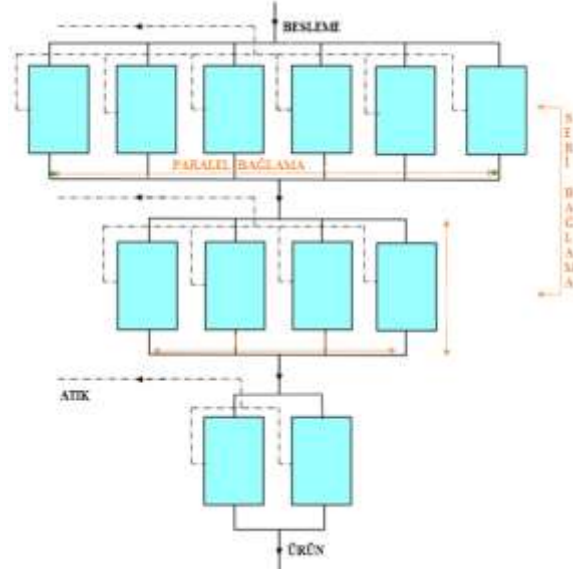
<i>Hız (m/s)</i>	<i>a (max.)</i>	<i>Sıcaklık (K)</i>	<i>ΔU (SWU/yıl)</i>
300	6,931173268	300	2,169564996
400	7,229188348	300	6,856896777
500	7,631255194	300	16,74047065
600	8,153161903	300	34,71303993
700	8,816167011	300	64,31019204
800	9,648442293	300	109,7103484
900	10,68706009	300	175,7347647

Gerekli zenginleştirme düzeyini tek bir santrifüjde gerçekleştirmek mümkün olmadığından santrifüjler art arda bağlanır. Bir santrifüj' den geçen gazın akış hızının yüksek olmadığı zamanlarda çok sayıda santrifüjün paralel bağlanarak kaskat sayısı artırılır.

4. KASKATLAR

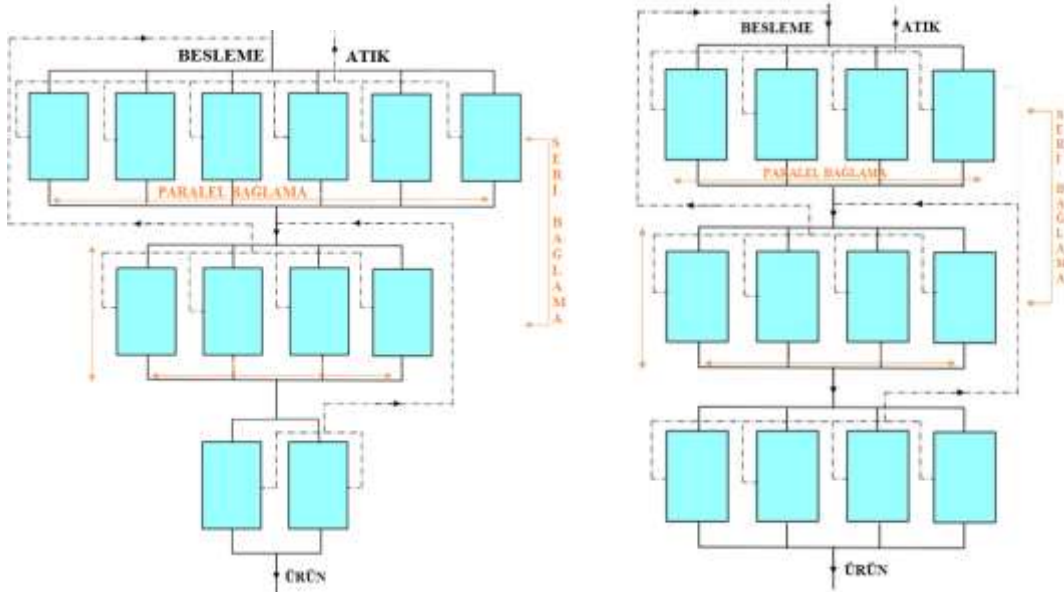
Kaskat, etkin bir şekilde ürün akımının zenginleştirme düzeyini arttırmak için birden fazla santrifüj makinesinin seri ve paralel olarak bağlanması olarak isimlendirilir. Üründen istenen zenginlik kaskat aşamalarının sayısını belirler.

Nükleer Yakıt Zenginleştirme



Şekil 2. Basit bir kaskatın şematik görünümü.[10].

Şekilde 2' de görüldüğü gibi kaskatlar da besleme girişi, ürün ve fakir akım çıkışı bulunmaktadır. Günümüzde farklı tür kaskatlar vardır. Geri dönüşümlü kaskat, simetrik kaskat ve kare kaskatlar bunlara örnek verilebilir. Geri dönüşümlü kaskatlar, zenginleştirme ve sıyırma bölümlerinden oluşmaktadır. Bu bölümler besleme noktasında birleşir. Sıyırma kısmında elde edilmiş zengin akım besleme akımına ilave edilir. Simetrik ve kare kaskatların şekilleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. Simetrik ve kare kaskatın şematik görünümü.

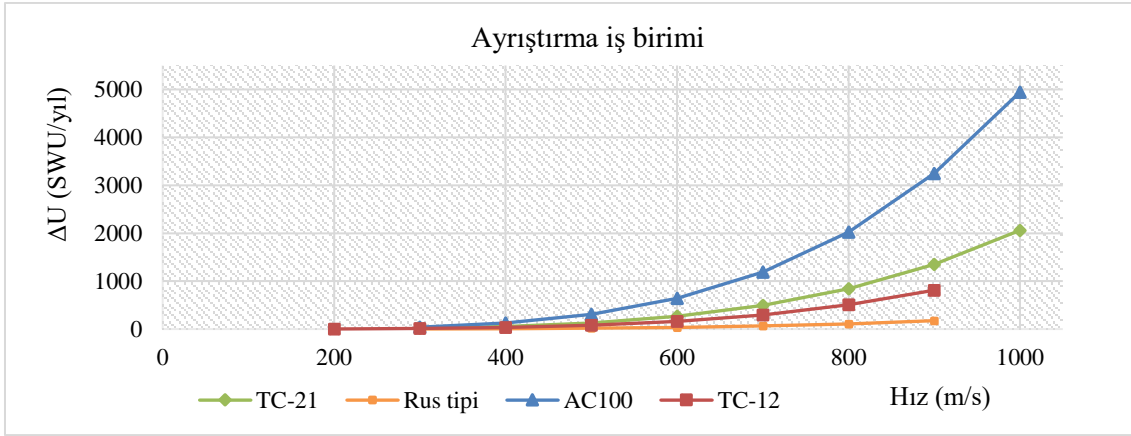
Simetrik kaskatlar da fakir akım bir önceki kademeye gönderilirken zengin akım bir sonraki kademeye gönderilir ve bu şekilde devam eder. Ürün ve atık uçlara doğru birlikte azalır. Kare kaskatlar da ise tüm aşamalar aynı akış oranına sahiptir bu sebeple her aşamada makine sayısı aynıdır. Bu tür kaskatlar verimli değildir ve nadiren kullanılır. İyi verim oranları elde etmek amacıyla her bir santrifüj performansı ve çıkış akımları sürekli takip edilmektedir.

5. SONUÇ ve YORUM

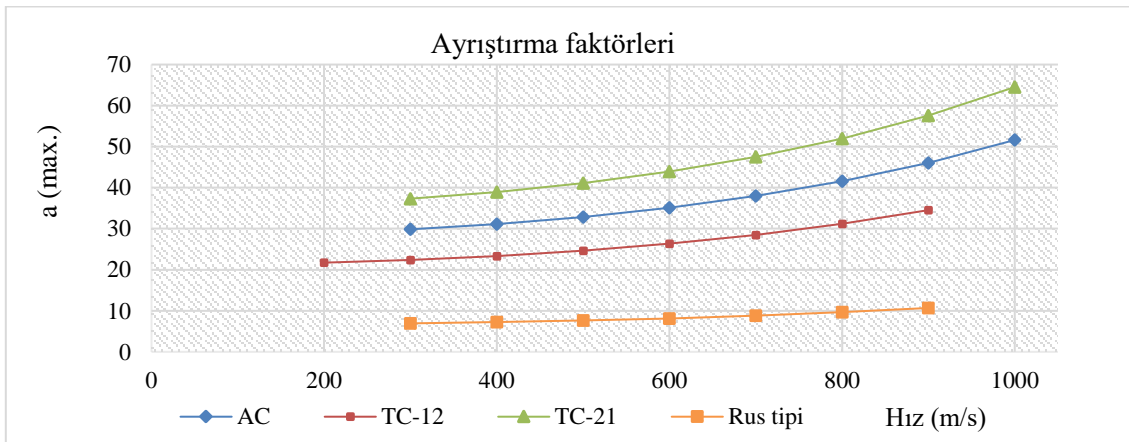
Santrifüj ile zenginleştirme yönteminin en önemli avantajlarından biri, tesis kapasitesinin genişletilmesindeki kolaylığıdır. Ek kapasite ekonomik avantajlar sağlayan pazar taleplerine göre hızlı bir şekilde büyütülmektedir.

Santrifüj yöntemi difüzyon yöntemine göre daha avantajlıdır. Çünkü aynı ayırma işi kapasitesi için %96 daha az elektrik kullanır. Örneğin 10 milyon kg-SWU/yıl kapasiteli bir difüzyon tesisi 2700 MW elektrik güç gerektirirken, aynı kapasitede bir santrifüj tesisi 109 MW elektrik kurulu güç gerektirir[2].

Santrifüj 'ün ayırma iş birimi santrifüj boyu ve hızı ile orantıdır. Bu sebeple hız ve santrifüj uzunluğunun büyük olması istenir. Ancak santrifüjün hızı ve boyu değiştirmeden verim arttırılmak istenirse o zaman kaskat sayısı arttırılmalıdır. Örneğin Rus tipi santrifüjlerin boyu ve hızı diğerlerine göre daha küçük olduğundan verimi arttırmak için kaskat sayısı arttırılır. Şekil 4' te farklı tip santrifüjlerin 300 K de ayırma iş birimleri gösterilmiştir.



Şekil 4. T=300 K' de farklı tip santrifüjlerin ayırma iş birimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5. 300 K de farklı tip santrifüjlerin ayırma faktörlerinin karşılaştırılması.

Nükleer Yakıt Zenginleştirme

Şekil 4 'te görüldüğü gibi rotor uzunluğu büyük olan AC100 santrifüj daha büyük ayrıştırma iş birimine sahiptir. Ancak ayrıştırma faktörleri karşılaştırıldığında TC-21 tip santrifüj 'ün ayrıştırma faktörünün daha büyük olduğu görülür.(şekil 5).

Bir kaskat' ta verimi arttırmak için kademe başına makinelerin sayısı arttırılır. İdeal bir kaskat' ta her aşama için aynı ayrıştırma faktörüne sahip olması gerekir çünkü farklı konsantrasyonlardaki akımların karışımı en aza indirilir. Böylece enerji tüketimini azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Kessler G. Çeviren: Süleyman Sırrı ÖZTEK, Nükleer Fisyon Reaktörleri, Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EUAS): Translation from the English language edition:2003.
- [2]. Lamarsh JR, Baratta AJ. Çeviren: Okan ZABUNOĞLU, Nükleer Mühendisliğe Giriş (3rd edition), Palme yayınları: Translation from the English language edition:2015. ISBN: 978-605-355-309-0.
- [3]. Kee E, Fauver JC, ACP & World Enrichment Market Final, NERA Economic Consulting 1255 23rd Street, NW Washington, DC 20037 www.nera.com
- [4]. Heriot I D, Uranium Enrichment By Gas Centrifuge, Published by the commission of the european communities, ISBN 92-825-8960-9. Catalogue number: CD-NA-11486-EN-C.
- [5]. Glaser A, Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation (corrected), Science and Global Security, 16:1–25, 2008 Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 0892-9882 print / 1547-7800 online DOI: 10.1080/08929880802335998.
- [6]. Laughter M D, Profile of World Uranium Enrichment Programs-2009, Global Nuclear Security Technology Division, ORNL/TM-2009/110.
- [7]. Sullivan P E, Final Scientific Technical Report July 2014, USEC Inc. DOE Cooperative Agreement No. DENE0000530.
- [8]. Tokgöz SR, Kemah E, Akkaya R, Nükleer Yakıt Üretiminde, Hızlandırıcı Kaynaklı Sistemler (ADS) ile Konvansiyonel Zenginleştirme Sistemlerinin Karşılaştırılması, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ISSN: 2148-7464,p.p211-221, 18-20 June 2014, Karabük University ISITES2014.
- [9]. Bukharin O, Russia's Gaseous Centrifuge Technology And Uranium Enrichment Complex, Program on Science and Global Security Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, January 2004.
- [10].<http://fas.org/issues/nonproliferation-counterproliferation/nuclear-fuel-cycle/uranium-enrichment-gas-centrifuge-technology/enrichment-cascades/>