



Stronsiyum Hekzaferrit Esaslı Ticari Seramik Mıknatısların Mikroyapısal Ve Manyetik Karakterizasyonu

Microstructural and Magnetic Characterization of The Commercial Strontium Hexaferrite Ceramic Magnets

Burcu Ertuğ¹

¹ Nişantaşı Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Maslak 1453 NeoTech Kampüsü 34398 İstanbul, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 19/03/2019

Kabul / Accepted: 08/09/2019

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/09/2019

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2020

Öz

Bu çalışmada, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ esaslı ticari ferrit mıknatıslarının, mikroyapısal ve manyetik karakterizasyonu yapılmıştır. Yoğunluk hesaplamaları, Y30BH ve DM33H örneklerde sırasıyla, 9,4 ve 4,9 g/cm^3 değerlerine karşılık gelen düşük porozite yüzdeleri vermiştir. Örneklerde taneler arası porozite yüzdesinin düşük olduğu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri ile de doğrulanmıştır. Manyetik özellikler için histerizis eğrileri, Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile belirlenmiştir. Doyma ve kalıcı manyetizasyonlar, Y30BH örnek için sırasıyla, 56,45 emu/g ve 32 emu/g olup DM33H örneğin manyetizasyon değerlerinden daha yüksektir. Y30BH örneğin yüksek manyetizasyonu, stronsiyum hekzaferrit faz miktarının yüksek olması ile açıklanabilir. Y30BH örnekte yüksek manyetizasyona daha düşük koerzivite, H_c 3750 Oe değeri eşlik etmektedir. Y30BH ve DM33H mıknatıslarda maksimum enerji çarpanı (BH)max ise, sırasıyla 55,7 ve 34,2 kJ/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Hekzaferrit, sert mıknatıs, histerizis, manyetizasyon, koerzivite”

Abstract

In the present study, the microstructural and magnetic characterization of the commercial $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ magnets have been carried out. Density calculations for Y30BH and DM33H samples yielded 9.4 and 4.9 g/cm^3 , respectively corresponding to low porosity percentages. Scanning Electron Microscopy (SEM) examinations confirmed that there is a low amount of intergranular porosity. The magnetic hysteresis curves have been determined by using Vibrating Sample Magnetometer (VSM). The saturation and remanent magnetization of Y30BH sample have been 56.45 emu/g and 32 emu/g, respectively thus they have been higher than those of DM33H sample. Improved magnetization of Y30BH sample can be attributed to the high content of strontium hexaferrite phase with a lower coercivity, H_c 3750 Oe. Maximum energy products, (BH)max have been calculated to be 55.7 and 34.2 kJ/m^3 , respectively for Y30BH and DM33H magnets.

Key Words

“Hexaferrite, hard magnet, hysteresis, magnetization, coercivity”

1. Giriş

Arais vd. (2018)'ne göre katı hal elektroniği alanındaki hızlı gelişmeler, ferritlerin değişik frekans aralıklarındaki davranışlarının detaylı olarak incelenmesini zorunlu hale getirmiştir. Öte yandan hekzagonal yapıda ferritler, son derece geniş aralıkta değiştirilebilen manyetik özellikleri nedeniyle, çok sayıda elektronik ve mikrodalga cihazda kullanılmaktadırlar.

Koutzarova vd. (2010) ve Tanwar vd. (2018)'nin çalışmalarına göre, altı farklı sınıftan oluşan hekzaferritlerin çoğunun, ana birim olarak M-yapısını içermektedir. Bu yapı, en basit yapı olup R ve S bloklarından oluşmaktadır. R blok, $BaFe_6O_{11}$ stokiometrisine sahiptir ve yapısında 5 adet oktahedral ve 1 adet trigonal bipiramidal konumu içermektedir. S blok ise spinel yapısında olup 2 tetrahedral ve 4 oktahedral konumlarına sahiptir. Hekzaferrit kafesindeki 5 farklı arayer konumları, Fe^{+3} iyonları tarafından doldurulmuştur. Bunlardan S blokta bulunan iyonlar, oktahedral 2a ve tetrahedral 4f1 konumlarına; R blokta bulunanlar, bipiramidal 2b ve oktahedral 4f2 konumlarına; R-S arayüzeyinde bulunanlar ise, oktahedral 12k konumlarına yerleşmişlerdir.

Wu vd. (2016); Sardjono vd. (2016) ve Narang ve Huidara (2006)'nın çalışmalarında, Fe^{+3} iyonu başına net manyetik moment, 5 μB olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, baryum hekzaferrit bileşiğinin formül başına net manyetik momenti ise, 20 μB olmaktadır. Baryum ve stronsiyum hekzaferrit, $MO_6Fe_2O_3$ (M=Ba,Sr,Pb) genel formülüne sahip seramik esaslı mıknatıslar olup manyetik özellikleri çok yüksek değildir. Koerziviteleri ise, AlNiCo mıknatıslarından daha yüksektir. Curie sıcaklıkları, 450-460°C civarındadır. M-tipi hekzaferrit sistemleri, tek eksenli kolineer ferrimanyetik mıknatıslardır, kolay manyetizasyon doğrultuları, hekzagonal c-eksenine paraleldir. Fe konumlarının manyetik momentleri, R ve S bloklarının içerisinde, kolineer ferrimanyetik yapılar içerisinde, ab düzleminde bulunur. Fe^{+2} iyonlarından komşu Fe^{+3} iyonlarına elektron transferine bağlı ferromanyetik Fe^{3+} - Fe^{+2} etkileşimi ve oktahedral konumlarındaki Fe^{+2} anizotropisi, demir iyonlarının, tüm hekzaferrit yapılarında gözlenen hakim mekanizmadır (MS-Schramberg GmbH & Co. KG 2017).

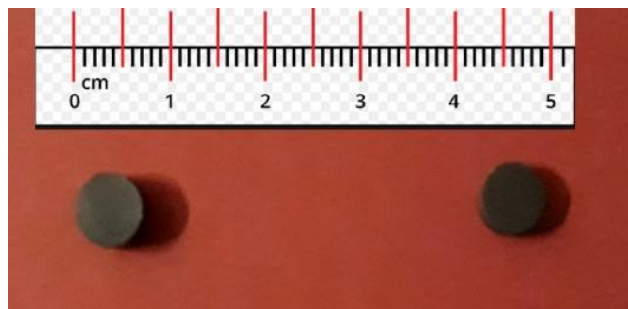
Yamamoto vd. (1997), katı hal sentezi; Pullar vd. (2001), birlikte çöktürme; Jean vd. (2010), sol-jel; Zhong vd. (1997a), hidrotermal yöntem; Alamolhoda vd. (2006), cam kristalizasyonu; Sivakumar vd. (2012), yanma reaksiyonu yöntemleri kullanılarak hekzaferritlerin manyetik özelliklerini geliştirilmeye çalışılmıştır. Ultra ince partikül eldesi amacıyla, kimyasal birlikte çöktürme, hidrotermal ve sol-jel yöntemleri, oto-yanma sentezi yöntemi kullanılmaktadır. Samikannu vd. (2011) ve Chaudhury vd. (2008) çalışmalarında, bu yöntemler arasında sol-jel oto-yanma yöntemi, maliyetinin düşük olması ve yöntemin basitliği nedeniyle, homojen ultra ince toz üretiminde öne çıkmıştır.

Zhong vd. (1997b), stronsiyum ferritler üzerinde, yüksek tek eksenli manyetik anizotropi, yüksek doyma manyetizasyonu ve yüksek koerzivite özelliklerini incelemiştir. Stronsiyum ferritler, diğer yöntemlerin yanı sıra, Brito vd. (2006) tarafından mikro-emülsiyon ve Wang vd. (2010) tarafından sitrat ile başlanan prosesler kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, Mangai vd. (2014) ve Mallick vd. (2007), yüksek saflıkta, ultra ince boyutta, iyi dispersiyon ve mükemmel manyetik özelliklere sahip $SrFe_{12}O_{19}$ üretimini gerçekleştirmişlerdir. Öte yandan, baryum ve stronsiyum ferritler, yüksek elektriksel özdirençleri ve düşük eddy akımı kayıpları nedeniyle diğer manyetik malzemelerden üstündürler (Sadulloğlu vd. 2011).

Bu çalışmada, iki firmadan temin edilen stronsiyum hekzaferrit esaslı sert mıknatısların ferromanyetik histerizis eğrileri çıkarılarak manyetik parametreleri belirlenmiştir. Sert ferrit mıknatıslar, yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek koerziviteye sahiptirler. Aynı zamanda, 300°C'e kadar yüksek sıcaklık kararlılığı gösterirler ve sıcaklık yükseldikçe koerziviteleri artar. Bu özellikleri nedeniyle sert ferrit mıknatıslar, hoparlör bobini, doğru akım motoru vb. uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar (Imagnetshop 2019). Güncel bir analizde, ferrit pazarının büyüme trendleri, büyük üreticiler, ferrit mıknatıs kullanan sektörler ve 2019-2023 dönemi için gelecek projeksiyonu ele alınmıştır. Bu analize göre küresel ferrit mıknatıs pazarının lideri % 52.30 üretim payına sahip Çin olup Japonya, ikinci en büyük üreticidir ve küresel üretimin %13.82'ini oluşturmaktadır (Marketwatch 2019). Bu çalışmanın amacı, ülkemizde yerli sert ferrit mıknatısların üretimini yaygınlaştırılması ve daha ekonomik hale getirilmesi için ticari ferrit mıknatısların karakterizasyonunun yapılarak özelliklerinin belirlenmesidir.

2. Materyal ve Metot

Ticari seramik mıknatıslar, Şekil 1'de gösterilen DM33H (Mıknatıs Ltd., İzmir) ve Y30BH (Manyet Ltd., İstanbul) kodlarına sahip pelet şeklinde örneklerdir. Pelet örneklerin yoğunlukları, boyutlar hassas olarak ölçülerek ve pelet ağırlıklarının ise hassas terazi yardımıyla tartımları alınarak ile hesaplanmıştır ve sinterlenmiş halde yoğunluklar, teorik yoğunluklar ile kıyaslanmıştır.



Şekil 1. Y30BH ve DM33H mıknatıs peletlerinin boyutları.

Seramik örneklerin mikroyapısal özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (JEOL-JSM 6060-2003) yardımıyla incelenmiştir. SEM incelemeleri için, önce örnekler demanyetizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Demanyetizasyon ısıl işlemi, 5°C/dakika ısıtma hızı ve 10°C/dakika soğutma hızı ile 460°C'de 2 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizleri için her iki örneğin yüzeyleri, takım zımpara ile hazırlanmış ve daha sonra keçe yardımıyla parlatılmıştır. Yüzeyler etil alkol ile temizlendikten sonra kurutulmuştur.

Y30BH ve DM33H mıknatıs örneklerin manyetik özellikleri, oda sıcaklığında 15kOe manyetik alan altında Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) (Quantum design, Model-PPMS9T, USA) kullanılarak belirlenmiştir. Manyetik histerizis eğrileri kullanılarak her iki örnek için doyma (M_s , emu/g) ve kalıcı manyetizasyon (M_r , emu/g) ve koerzivite (H_c , kOe) değerleri belirlenmiştir.

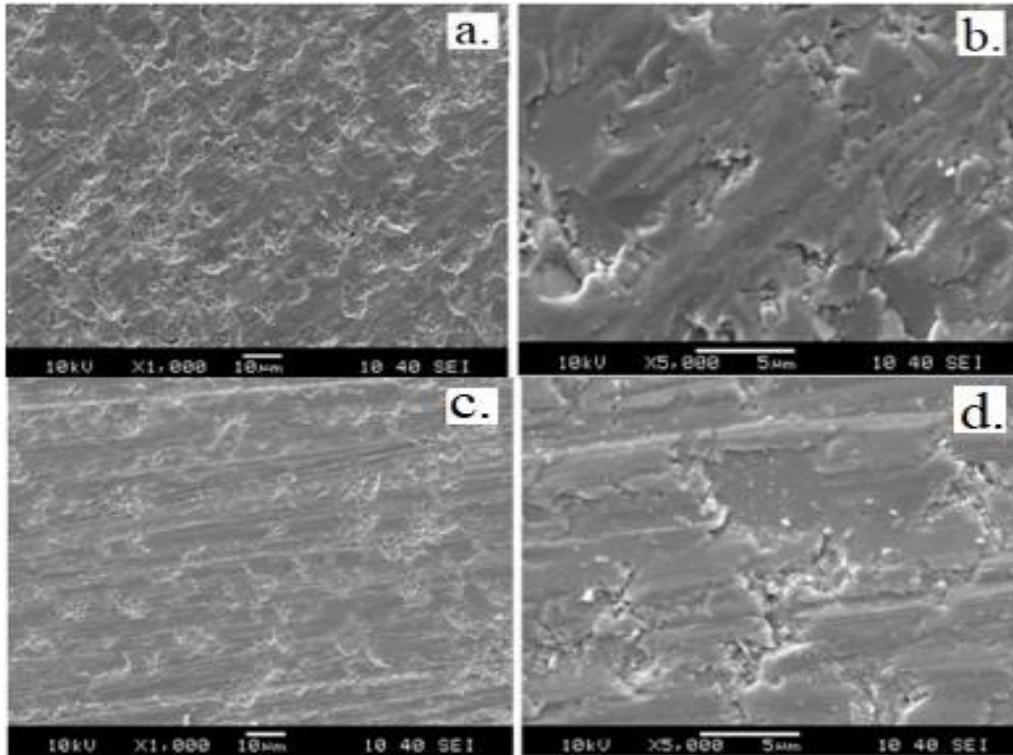
3. Bulgular ve Tartışma

SEM görüntüleri (Şekil 2), hekzaferritlere özgü hekzagonal tane morfolojisini belirgin olarak göstermemiştir. Bunun nedeni sinterleme sırasında mikroyapıda tanelerin aglomerasyona uğrayarak büyümesi ve kompakt bir yapı oluşturmasıdır. Taneler arası porozite ihmal edilebilir düzeydedir ve bu düşük porozite hali, ferrit malzemelerde üstün manyetik özellikleri elde etmek için gereken bir mikroyapısal özelliktir. SEM görüntülerinde gözlenen düşük porozite, sinterlenmiş halde yoğunluk yardımıyla hesaplanan Tablo 1'de verilen porozite yüzdesi değerleriyle uyumludur. Seramik esaslı ticari kalıcı hekzaferrit mıknatıslarda yoğunluklar 4,9-5,0 g/cm³ civarındadır (E-magnets 2019).

Sebayang vd. (2016) ve Dushaq vd. (2013)'ne göre yüksek yoğunluk, doyma manyetizasyonun ve kalıcı manyetizasyonun yüksek olması için gereklidir. Bu çalışma sonucu, maksimum 4,66 g/cm³ yoğunluğa ulaşılmıştır.

Tablo 1. Ferrit esaslı mıknatısların yoğunluklarının karşılaştırılması.

No	Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)	Referans
1	4,71	3,90	Sardjono vd. (2016)
2	4,22	13,9	Mallick vd. (2007)
3	4,00	18,4	Sadullahoğlu vd. (2011)
4	4,55	7,14	Sebayang vd. (2016)
5	4,44	9,40	Y30BH
6	4,66	4,90	DM33H



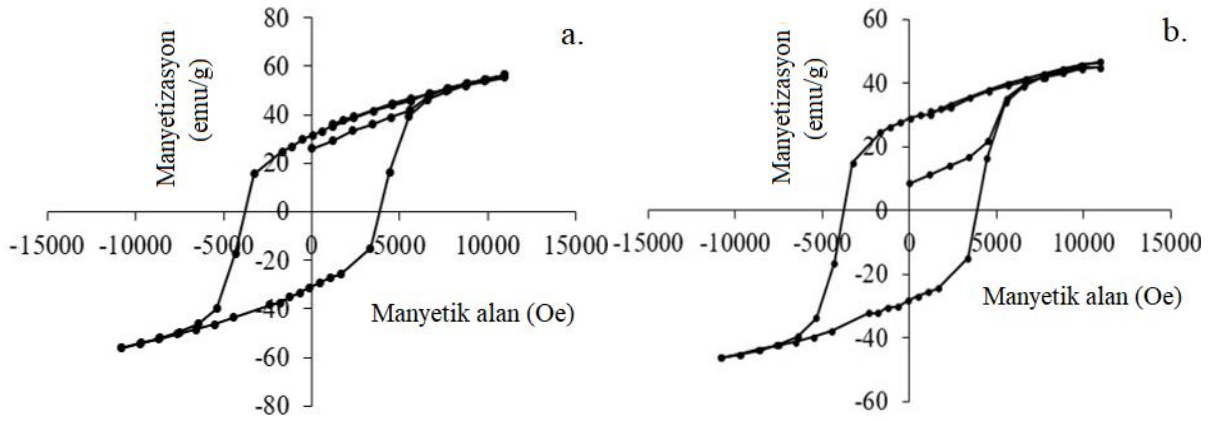
Şekil 2. Y30BH için (a) x1kx, (b) x5kx ve DM33H için (c) x1kx, (d) x5kx büyütme SEM görüntüleri.

Ticari Y30BH ve DM33H mıknatıs örneklerinin, manyetik parametreleri, Şekil 3’de verilen manyetik histerizis eğrilerinden belirlenmiştir. Tablo 2’de Y30BH ve DM33H örnekleri, ticari mıknatıs TM-1 ve TM-2 olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Hekzaferrit mıknatısların manyetik özelliklerinin karşılaştırılması.

No	Bileşim	Doyma manyetizasyon (emu/g)	Kalıcı manyetizasyon (emu/g)	Koerzivite (kOe)	Referans
1	BaF	61,0	30	4,50	Mallick vd. (2007)
2	BaF	68,7	28	1,23	Sadulloğlu vd. (2011)
4	BaF	60,0	40	1,57	Sebayang vd. (2016)
5	SrF	60,0	35,8	6,10	Dushaq vd. (2013)
6	SrF	67,2	39,1	6,0	Tan ve Chen (2013)
7	SrF	60,0	35,14	7,0	Luo vd. (2015)
8	TM-1	56,45	32	3,80	Y30BH
9	TM-2	46,68	28	4,00	DM33H

Her iki mıknatısa ait manyetik histerizis eğrileri, oda sıcaklığında tipik sert ferrimanyetik davranışı göstermiştir. Y30BH örnek, ticari uygulama açısından en popüler sert ferritlerden birisidir. Doyma manyetizasyon, M_s verileri, Y30BH ve DM33H örnekleri için, 56,45 emu/g ve 46,68 emu/g olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de verilen manyetik parametreler incelendiğinde, Y30BH ve DM33H örneklerinin doyma manyetizasyon değerlerinin, $SrFe_{12}O_{19}$ (SrF) ve $BaFe_{12}O_{19}$ (BaF) değerlerine göre daha düşük, koerzivitelerinin ise, kimi örneklerin değerlerine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. (a) Y30BH ve (b) DM33H örneklerinin histerizis eğrileri.

Dış manyetik alan altında, ticari mıknatısların manyetik domenlerinin düzenlenmesi sonucu elde edilen maksimum manyetizasyon, doyma manyetizasyon olarak ölçülmüştür. Doyma manyetizasyonları, M_s Y30BH ve DM33H mıknatıslar için, 10,97 kOe ve 10,98 kOe alan altında belirlenmiştir. Kalıcı manyetizasyon, M_r değerleri (sıfır manyetik alana karşılık gelir), Y30BH ve DM33H örnekleri için sırasıyla 32 emu/g ve 28 emu/g olarak ölçülmüştür. Kalıcı manyetizasyon, M_r doyma manyetizasyon değeri ile ilişkilidir. Bu nedenle hekzaferrit esaslı ticari kalıcı mıknatısların doyma manyetizasyonları beklendiği üzere yüksek olmuştur. Hekzaferrit mıknatıslar için kalıcı mıknatıslanmanın yüksek olması, M_r/M_s oranının 1’e yakın değer alması anlamına gelmektedir. M_r/M_s oranı, Y30BH ve DM33H örnekleri için sırasıyla, 0,57 ve 0,6 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen koerzivite değerleri ise, H_c Y30BH ve DM33H örnekleri için sırasıyla, 3750 Oe ve 4000 Oe olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Y30BH örneklerinin BH_{max} çarpanlarının hesaplanması.

						(BH) _{max} , MGxOe (kJ/m ³)
Manyetik alan, kOe	1,229	2,361	2,854	2,994	3,098	7,0 (55,7)
Manyetizasyon, G (emu/g)	(934,33)	(1795)	(2165,4)	(2274)	(2349,91)	
	15,49	29,76	35,9	37,7	39	

Tablo 4. DM33H örneklerin BHmax çarpanlarının hesaplanması.

						(BH) _{max} , MGxOe (kJ/m ³)
Manyetik alan, kOe	1,185	2,081	2,19	2,299	2,386	
Manyetizasyon, G (emu/g)	(901,76)	(1582,75)	(1664,8)	(1749,2)	(1815,6)	4,3 (34,2)
	14,95	29,76	27,6	29	30,1	

Çalışmada kullanılan hekzaferrit esaslı ticari kalıcı mıknatıslarda en önemli parametre, maksimum enerji çarpanı (BH)_{max} olduğundan, Şekil 3'teki manyetik histerezis eğrilerinin ikinci çeyrek bölgeleri kullanılarak Y30BH ve DM33H kalıcı mıknatısların yapabilecekleri maksimum işler hesaplanmıştır ve iş miktarları, Tablo 3 ve Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Manyetik histerezis eğrisinin ikinci çeyrek bölgesi içinde çizilebilecek en büyük alana sahip dikdörtgeninin bulunması yardımıyla, Tablo 3 ve Tablo 4'te Y30BH ve DM33H örneklerin, BH_{max} çarpanları sırasıyla, 55,7 ve 34,2 kJ/m³ olarak hesaplanmıştır. Y30BH örneğin maksimum enerji çarpanı değerinin, DM33H örneğe göre yüksek olması, örneklerdeki kalıcı manyetizasyonu sağlayan stokiometrik stronsiyum hekzaferrit, SrFe₁₂O₁₉ fazı miktarının, Y30BH örnekte daha yüksek olması şeklinde yorumlanabilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı SrFe₁₂O₁₉ esaslı ticari sert ferrit mıknatısının, mikroyapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma sonucu, maksimum 4,66 g/cm³ yoğunluğa ulaşılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, her iki örnekte taneler arası porozite varlığının son derece düşük olduğunu ve mikroyapısal özelliklerin üstün manyetik özellik eldesi için uygun olduğunu göstermiştir.

Y30BH ve DM33H ticari mıknatıs örneklerde, doyma manyetizasyonlar, 56,45 emu/g ve 46,68 emu/g olarak ölçülmüştür. Kalıcı manyetizasyon, Mr değerleri yardımıyla hesaplanan Mr/Ms oranları Y30BH ve DM33H için, sırasıyla 0,57 ve 0,6 olarak hesaplanmıştır. Y30BH örnekte manyetizasyonun yüksek olması, manyetik stronsiyum hekzaferrit faz miktarının fazla olması şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan, Y30BH örnekte manyetizasyon değerleri yüksek olmakla birlikte, olası bir tane büyümesi dolayısıyla koerzivit değerleri düşmüştür. Söz konusu koerzivit değerleri, Hc Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 3750 Oe ve 4000 Oe olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ticari hekzaferrit mıknatıslarda maksimum enerji çarpanı (BH)_{max} Y30BH ve DM33H örnekler için sırasıyla, 55,7 ve 34,2 kJ/m³ olarak hesaplanmıştır.

Teşekkürler

Ticari DM33H örnek, Mıknatıs Araştırma ve Geliştirme Madencilik ve Tıbbi Aletler San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir ve Y30BH örnek, Manyet Ltd., İstanbul firmalarından temin edilmiştir. Örneklerin mikroyapı incelemeleri, Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ), Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Endüstriyel Hizmetler Birimi sorumlusu Metalurji Müh. Haluk Gürses tarafından gerçekleştirilmiştir. Manyetizasyon ölçümleri, İstanbul Teknik Üniversitesi (İ.T.Ü), Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Baki Altunçevahir tarafından gerçekleştirilmiştir.

Referanslar

- Alamolhoda, S., Seyyed Ebrahimi, S. A., & Badiei, A. (2006). Optimization of milling time before and after recalcination on HTR processed strontium hexaferrite powder. *The Physics of Metals and Metallography*, 102(1), 46-48. doi: 10.1134/S0031918X06140110
- Arais, A. A., Rady, K. E., & Shams, M. S. (2018). AC conductivity and dielectric properties of Mn-Zn ferrites. *Bulgarian Journal of Physics*, 45(1), 44-53.
- Brito, P. C. A., Gomes, R. F., Duque, J. G. S., & Macedo, M. A. (2006). SrFe₁₂O₁₉ prepared by the proteic sol-gel process. *Physica B: Condensed Matter*, 384(1), 91-93. doi: 10.1016/j.physb.2006.05.159
- Chaudhury, S., Rakshit, S. K., Parida, S. C., Singh, Z., Singh, M. K. D. & Venugopal, V. (2008). Studies on structural and thermo-chemical behavior of MFe₁₂O₁₉(s) (M = Sr, Ba and Pb) prepared by citrate-nitrate gel combustion method. *Journal of Alloys and Compounds*, 455(1-2), 25-30.
- Dushaq, G. H., Mahmood, S. H., Bsoul, I., Juwhari, H. K., Lahlouh, B., AlDamen, M. A. (2013). Effects of molybdenum concentration and valence state on the structural and magnetic properties of BaFe_{11.6}Mo_xZn_{0.4-x}O₁₉ hexaferrites. *Acta Metallurgica Sinica*, 26 (5), 509-516. doi:10.1007/s40195-013-0075-2
- Jean, M., Nachbaur, V., Bran, J. & Le Breton, J. M. (2010). Synthesis and characterization of SrFe₁₂O₁₉ powder obtained by hydrothermal process. *Journal of Alloys and compounds*, 496 (1-2), 306-312. doi:10.1016/j.jallcom.2010.02.002

Koutzarova, T., Kolev, S., Grigorov, K., Ghelev, C., Zaleski, A., Vandenberghe, R. E., Ausloos, M., Henrist, C., Cloots, R. & Nedkov, I. (2010). Structural and magnetic properties of nanosized barium hexaferrite powders obtained by microemulsion technique. *Solid State Phenomena*, 159, 57-62. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.159.57

Luo, J., Xu, Y. & Mao, H. (2015). Magnetic and microwave absorption properties of rare earth ions (Sm^{3+} , Er^{3+}) doped strontium ferrite and its nanocomposites with polypyrrole. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 381(1), 65-37. doi:10.1016/j.jmmm.2015.01.019

Mallick, K. K., Shepherd, P. & Green, R.J. (2007). Magnetic properties of cobalt substituted M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 312, 418-429. doi:10.1016/j.jmmm.2006.11.130

Mangai, K. A., Sureshkumar, P., Priya, M. & Rathnakumari, M. (2014). Structural and magnetic properties of strontium hexaferrites for permanent magnets. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(3), 65-69.

Narang, S. B., Huidara, L. S. (2006). Microwave dielectric properties of M-type barium, calcium and strontium hexaferrite substituted with Co and Ti. *Journal of Ceramic Processing Research*, 7(2), 113-116.

Pullar, R. C., Taylor, M. D. & Bhattacharya, A. K. (2001). Halide removal from BaM ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) and SrM ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) ferrite fibers via a steaming process. *Journal of Materials Research*, 16(11), 3162-3169. doi:10.1557/JMR.2001.0436

Sadullohoğlu, G., Ertuğ, B., Gökçe, H., Altuncevahir, B., Öveçoğlu, M. L. & Addemir, A. O. 5-9 Ekim (2011). The effect of rare-earth cations on the structural properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hard magnets. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ankara ODTÜ.

Samikannu, J., Sinnappan, Mannarswamy, S., Cinnasamy, T. & Thirunavukarasu, K. (2011). Synthesis and magnetic properties of conventional and microwave calcined strontium hexaferrite powder. *Materials Sciences and Applications*, 2(6), 638-642. doi:10.4236/msa.2011.26087.

Sardjono, P., Muljadi, S. & Djauhari, N. R. (2016). Microstructure, physical properties, and magnetic flux density analysis of permanent magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ using milling and sintering preparation methods. *Journal of Physics Conference Series*, 739(1), 012-089. doi: 10.1088/1742-6596/739/1/012089

Sebayang, P., Sari, A. Y., Ginting, D., Allan, Y., Nasruddin, M. N. & Sebayang, K. (2016). Characteristics of B_2O_3 and Fe added into $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ permanent magnets prepared at different milling time and sintering temperature. *AIP Conference Proceedings*, 1711, 020004. doi:10.1063/1.4941613

Sivakumar, P., Ramesh, R., Ramanand, A., Ponnusamy, S. & Muthamizhchelvan, C. (2012). Synthesis and study of magnetic properties of NiFe_2O_4 nanoparticles by PVA assisted auto-combustion method. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 23(5), 1011-1015. doi:10.1007/s10854-011-0539-y

Tan, G., Chen, X. (2013). Synthesis, structures, and multiferroic properties of strontium hexaferrite ceramics. *Journal of Electronic Materials*, 42(5), 906-911. doi:10.1007/s11664-012-2426-6

Tanwar, K., Sri Gyan, D., Gupta, P., Pandey, S., Parkash, O. & Kumar, D. (2018). Investigation of crystal structure, microstructure and low temperature magnetic behavior of Ce^{4+} and Zn^{2+} co-doped barium hexaferrites ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$). *RSC Adv.*, 8, 19600-19609. doi: 10.1039/C8RA02455C

Wang, Z. Y., Zhong, L. M., Lv, J. L., Qian, H. C., Zheng, Y. L., Fang, Y. Z., Jin, M. L. & Xu, J. Y. (2010). Microwave-assisted synthesis of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(18), 2782-2785. doi:10.1016/j.jmmm.2010.04.027

Wu, C., Yu, Z., Sun, K., Nie, J., Guo, R., Liu, H., Jiang, X. & Lan, Z. (2016). Calculation of exchange integrals and Curie temperature for La-substituted barium hexaferrites. *Scientific Reports*, 6(36200) doi: 10.1038/srep36200

Yamamoto, H., Kumehara, H., Takeuchi, R. & Nishio, N. (1997). Magnetic properties of Sr-M ferrite fine particles. *Journal de Physique IV Colloque*, 07 (C1), C1-535-C1-536. doi:10.1051/jp4:19971219

Zhong, W., Ding, W., Zhang, N., Hong, J., Yan, Q. & Du, Y. (1997). Key step in synthesis of ultrafine $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ by sol-gel technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 168(1-2), 196-202. doi:10.1016/S0304-8853(96)00664-6

Zhong, W., Ding, W., Jiang, Y., Zhang, N., Zhang, J., Du, Y. & Yan, Q. (1997). Preparation and magnetic properties of barium hexaferrite nanoparticles produced by the citrate process. *Journal of American Ceramic Society*, 80(12), 3258-3262. doi:10.1111/j.1151-2916.1997.tb03264.x

MS-Schramberg GmbH & Co. KG web site 2017: <https://www.magnete.de/en/products/sintered-magnets.html>

Manyet Ltd., İstanbul web site 2019: <http://www.manyet.com/>

Miknatis Araştırma ve Geliştirme Madencilik ve Tıbbi Aletler San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir web site 2019: <http://www.miknatis.net/miknatis/>

E-magnets web site 2019: https://e-magnetsuk.com/ferrite_magnets/characteristics.aspx

Imagnetshop web site 2019: <https://www.imagnetshop.com/en/magnet-applications/current-applications-of-ferrite-magnets-b10.html>

2019-2023 Global Ferrite Magnets Consumption Market Report: Marketwatch web site 2019: <https://www.marketwatch.com/>