

Termoelektrik Malzemelerin Yenilikçi Yaklaşımlarla Üretilmesi Ve Geliştirilmesinde Yapay Sinir Ağları İle Tahmin Modeli Kullanımı

*¹Şeyma ÖZBİLGE ²Muharrem DÜĞENCİ ve ³Hüseyin KURT

*¹Karabük / Sakarya Üniversitesi Ortak Program, Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği ABD,

²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü

³Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Termoelektrik malzemeler, ısı farkından doğan enerji ile elektrik enerjisi üretmeye yarayan malzemelerdir. Bu malzemelerin, ısıya dayanıklılığı, ısıyı tutması, koruması; malzeme yapısına ve ortam şartlarına göre değişmektedir. Bu değişkenler dikkate alınarak malzemelerin geliştirilmesi, insan faktörünün de etkisiyle, deneysel olarak her zaman doğru sonuç alamamaya sebep olmaktadır. Literatür araştırmasından tanımlanan bazı elementlerin bazı özellikleri, termoelektrik malzemelerin elektriksel direncini değiştirmektedir. Bu özellikler, elementlerin atom ağırlıkları, katkı oranları, sıcaklık değerleri, toz üretim yöntemi ve pres yöntemidir. Yapay Sinir Ağları ile eğitilen veriler ile tahmin modeli oluşturulmuştur.

Yapılan deneysel sonuçlardan alınan verilerin MATLAB-YSA paket programında incelenmesi ile zaman ve enerji kaybı önlenmiş, doğruluk yüzdesi tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, zaman kaybı, maliyet ve enerji kaybının önüne geçilmiştir. Termoelektrik malzemelerin geliştirilmesinde en önemli etmenlerden biri olan elektriksel direnç değerleri MATLAB-YSA programı ile başarı ile tahmin edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Termoelektrik malzemeler, Yapay Sinir Ağları, Tahmin Modeli

Thermoelectric Materials Production with Innovation and Improvement in the Use of Artificial Neural Networks Forecast Model

Abstract

Thermoelectric materials are the materials for producing electricity with temperature differences, heat resistance, maintaining the temperature and protection of these materials varies depending on the construction material and environmental conditions. The development of material based on these variables with the influence of the human factor, experimentally causes sometimes not to get inaccurate results. Some properties of some elements that change the electrical resistance of thermoelectric materials are determined from literature survey. These properties are atomic weights of elements, addition ratio, temperature values, process of powder production and pressing method. Datas trained with Artificial Neural Networks are formed by prediction model.

The data from the experimental results with the examining on the package program MATLAB – ANN prevented loss of time and energy estimated accuracy percentage. As a result, waste of time, cost and energy prevented. Electrical resistance values of one of the most important agent in the developing of thermoelectric materials are estimated successfully with program of the MATLAB-ANN.

Key words: Thermoelectric Materials, Artificial Neural Network, Prediction Model

1. Giriş

Son yıllarda elektriğe olan talebin artması, fosil yakıtların hızla tüketilmesi ve çevresel kirlenmelerin artışı dikkatleri yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çekmektedir[1]. Günümüzde termoelektrik jeneratörler; otomobiller, fabrikalar ve benzer kaynaklardan atılan ısının geri kazanımı ile elektrik enerjisi üretebilen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Ortam sıcaklıklarında verimleri düşük olmasına rağmen, atık ısının bulunduğu yüksek sıcaklıklarda termoelektrik jeneratörlerin kullanılması enerji geri kazanımı açısından önemlidir. Bu anlamda figure of merit (ZT) değeri yüksek p- ve n-tipi termoelektrik seramik yarıiletken malzemelerden üretilmiş, çıkış voltajı ve gücü yüksek yeni termoelektrik jeneratörlerin araştırılması ve ticari olarak kullanımı oldukça önemlidir. Önerilen çalışmada, yenilikçi yaklaşımlar kullanılarak ZT değeri yüksek yeni termoelektrik yarıiletken malzemeler araştırılacaktır.

Yapay Sinir Ağları ile ilgili olarak, Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y. çalışmalarında, insan beyin fonksiyonundan esinlenen yapay sinir ağlarının(YSA), deneme yolu ile öğrenme ve genelleştirme yapabildiğini söylemişlerdir. Ayrıca, YSA'nın geleceği tahmin uygulamasıyla, veriler arasındaki bilinmeyen ve fark edilmesi güç ilişkileri ortaya çıkartabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, YSA'nın doğrusal bir model olmamasından dolayı, fark edilemeyen ilişkileri net bir şekilde ortaya koyarak, tahmin modelinin önemini vurgulamışlardır. [2]

Koç vd. çalışmalarında, taş dolgu dalgakıranların tasarımında yaygın olarak kullanılan Van der Meer denklemlerini hidrolik model deneylerinin sonuçlarından elde etmişlerdir. Tasarım aşamasında önemli bir değişkenlik ve belirsizlik kaynağı olarak yapının güvenilirliğini etkilemekte olan bu deney sonuçları ile taş dolgu kıyı yapılarının ön tasarımı için Van der Meer deney verilerini içeren bir “tasarım yapay sinir ağı” geliştirilmiş ve Mersin Yat Limanı ön tasarımı için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ileri beslemeli denetimli sinir ağlarının Van der Meer denklemlerine kıyasla daha yüksek bir modelleme yeteneği gösterebileceğini ortaya koymuştur. Deterministik yöntemler yerine doğrusal olmayan yapay zeka tekniklerinin uygulanması ve bu sayede belirsizliklerin azaltılması ya da işlenebilmesi, taş dolgu dalgakıranların karmaşık modellere gereksinim duyulmadan tasarlanmasını sağlamıştır [3].

Ganesan vd. çalışmalarında dizel elektrik jeneratörleri ile çevresel problemlere dikkat çekmek için, CO₂ salınımı üzerinde durmuşlardır. Dizel elektrik jeneratörlerden salınan CO₂ seviyesinin tahmini için YSA'yı kullanmışlardır. Dizel elektrikli jeneratörlerin olağan ve etkili operasyonları için CO/CO₂ oranı, gaz sıcaklığı (TF) ve brüt verimlilik(η) verilerini kullanarak tahmin modelini kurmuşlardır. Ve bu veriler, elde edilen sonuçlara göre, eğitilmiş geri besleme yöntemini de uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, jeneratör performansını etkileyen verilerin değerlerini tahmin etmişlerdir. Verilerin hangi sonuçları için performansın istenilen seviyeye geleceğini deneyler yapılmadan ve zaman harcanmadan amaçlanan sonuçlara ulaşmışlardır [4].

2. Materyal ve Metot

2.1. Termoelektrik Malzemeler

İki farkı yarı iletken malzemelerin birbirine seri olarak birleştirilerek oluşturulan devrede, farklı sıcaklıklarda elektrik gerilimi ölçülür. Bu gerilim “ seebeck voltaji ” olarak da isimlendirilir. Devreden ölçülen gerilim, malzemelerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır[5].

Son yıllarda elektriğe olan talebin artması, fosil yakıtların hızla tüketilmesi ve çevresel kirleticilerin artışı dikkatleri yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çekmektedir [1]. Günümüzde termoelektrik teknolojiler enerjinin geri kazanılması ve çevresel etkileri azaltması açısından büyük önem arz etmektedirler. Bu anlamda termoelektrik jeneratörler; otomobiller, fabrikalar ve benzer kaynaklardan atılan ısının geri kazanımı ile elektrik enerjisi üretebilen alternatif aygıtlardır. Bu tür bir ısı geri kazanımı yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Ortam sıcaklıklarında verimleri düşük olmasına rağmen, atık ısının bulunduğu yüksek sıcaklıklarda termoelektrik jeneratörlerin kullanılması enerji geri kazanımı açısından önemlidir [5-6]. Bu aygıtlar diğer ısı makinalarına göre hareketli parçalarının olmaması, bakım gerektirmemeleri, kompakt, sessiz ve çevreci olmaları bakımından avantajlıdırlar [5,7-8].

Termoelektrik jeneratörler, Seebeck etkisi ile ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. P- ve n-tipi yarıiletken malzemelerin elektriksel olarak seri ve ısıl olarak paralel bağlanması ile geçerli bir voltaj ve elektriksel güç elde edilmektedir [9-10]. Termoelektrik malzemelerin verimi;

$$ZT=S^2\sigma T/\kappa$$

olarak verilen boyutsuz figure of merit (ZT) değeri ile belirlenir. Eşitlikte S Seebeck katsayısı ($\mu\text{V/K}$), σ elektriksel iletkenlik (S/m), T sıcaklık (K) ve κ ısıl iletkenlik (W/mK)'tir. ZT değerinin artırılması; Seebeck katsayısı ve elektriksel iletkenliğin artırılması, ısıl iletkenliğin ise azaltılmasına bağlıdır [7,11].

Termoelektrik malzemelerin verimi için önemli olan diğer bir husus da elektriksel iletkenliktir. Elektriksel iletkenliği artırmak için de, çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan en önemlileri, malzemeyi nano boyuta indirgemek, elektriksel iletkenliği arttırıcı bir element katkısı yapmak ve uygun kafes yapısının oluşumunu sağlamaktır[14].

Katkılanmamış $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 'in 1000 K'de ZT değeri 0.3 olarak bulunmuştur [15]. Bununla birlikte $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 'in termoelektrik özelliklerinin artırılması için birçok katkılama çalışması yapılmıştır. $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ için katkılara en iyi örnek olarak Cu [16], Ba, Ag ve Bi verilebilir. Su vd. (2011) yaptıkları çalışmada $\text{Ca}_{2.7}\text{Bi}_{0.3}\text{Co}_4\text{O}_9$ için 973 K'de $ZT=0.27$ değeri elde etmişlerdir [17]. Zhang vd. (2009) tarafından çok kristalli $\text{Ba}_{0.1}\text{Ag}_{0.1}\text{Ca}_{2.8}\text{Co}_4\text{O}_9$ numuneler hazırlanmış ve 973 K'de $ZT=0.29$ değeri elde edilmiştir [18]. Diğer yandan $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 'in termoelektrik özelliklerinin artırılması için nadir toprak elementleri de kullanılmıştır. Zhang vd. (2011), Matsubara vd. (2001a), Wang vd. (2004a, 2004b, 2004c), Liu vd. (2009) ve Song ve Nan (2011) yaptıkları

çalışmalarda $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 'e sırasıyla Pr, Gd, Eu, Dy, Sm, Gd ve La katkılamışlardır [19-25]. En iyi ZT değerlerini Sm ve Eu katkılayarak 1000 K'de $ZT=0.3$ ile Wang vd. (2004a, 2004c) elde etmişlerdir [21, 23]. Çalışmada 953 K'de $ZT=0.35$ değerine ulaşılmıştır. Şu ana kadar yapılmış çalışmalarda p-tipi $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ için en yüksek ZT değerine $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 'e hem Ag katkılayarak hem de Ag ekleyerek Wang vd. (2009) ulaşmıştır [26]. Lim vd. (2012) yaptıkları çalışmada 1 çift p-tipi $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ ve n-tipi $\text{Ca}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{MnO}_3$ kullanarak termoelektrik modül üretmişlerdir [27]. Van ve Pryds (2013) ise yaptıkları çalışmada 8 çift p-tipi $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ ve n-tipi $\text{Zn}_{0.98}\text{Al}_{0.02}\text{O}$ kullanarak $T_H=906$ K sıcak taraf sıcaklığı ve $\Delta T=496$ K sıcaklık farkında 65.3 mW çıkış gücü elde etmişlerdir [28].

2.2. Yapay Sinir Ağları Ve Termoelektrik Malzemeler İçin Tahmin Modeli Oluşturma

Yapay sinir ağları, biyolojik sinir ağlarından esinlenilerek ortaya çıkarılan ve biyolojik sinir ağlarına benzer bazı performans özellikleri içeren bir bilgi işleme sistemidir [12].

İnsan beyin fonksiyonundan esinlenen yapay sinir ağları (YSA), deneme yolu ile öğrenme ve genelleştirme yapabilmektedir. YSA'nın kullanıldığı önemli alanlardan biri de geleceği tahmindir. YSA, veriler arasındaki bilinmeyen ve fark edilmesi güç ilişkileri ortaya çıkartabilir. [2]. [13] Termoelektrik malzemelerin geliştirilmesinde en önemli unsurlardan biri olan elektriksel direnç veya tam tersi olan elektriksel iletkenlik değerinin elde edildiği veriler bu çalışmada araştırılmıştır. Bu veriler, literatürden elde edilen farklı elementlerin atom ağırlıkları, katkı oranları, farklı sıcaklık değerleri, toz üretim ve pres yöntemleri olarak tanım bilgileri çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmada, termoelektrik malzemelerin ZT (figure of merit) değerini etkileyen değişkenlerden olan elektriksel iletkenlik değerinin tahmin edilmesi için MATLAB2014b programının Yapay Sinir Ağları toolbox'ı kullanılmıştır.

Veri seti oluşturulurken, Baryum, Seryum, İtriyum, Bizmut, Gümüş, Disprozyum, Gadolinyum vb. elementlerin atom ağırlıkları ve birleştirilme oranları, sıcaklık değerleri, toz üretim yöntemi ve pres üretim yönteminden elde edilen literatür verileri ile çalışma eğitilmiştir. Elde edilen veriler normalize edilerek, Yapay Sinir Ağları paket programında eğitilmiştir.

Çalışmanın eğitim ve test verileri daha önce yapılan literatür araştırması ile elde edilmiştir. Toplamda 344 verinin, 330 adedi %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test verisi olarak program tarafından otomatik olarak kullanılmıştır. Son 14 değişken için tahmin yapması için örnek set oluşturulmuş ve tahmin sonuçları elde edilmiştir.

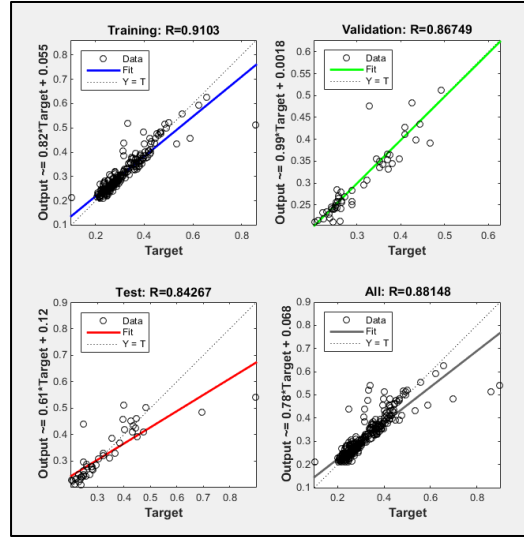
3. Sonuçlar ve Tartışma

Termoelektrik malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi amacıyla *elektriksel direnç* değerlerinin farklı değişken verilerine göre durumu izlenmiştir. Yapay Sinir Ağları ile deney yapılmadan, ekstra maliyet ve zaman harcanmadan sonuçlar tahmin edilmiştir.

Yapay Sinir Ağı'nda, girdi olarak alınan değişkenlere ait verilerin eğitilmesi ile, öğrenme oranı %87,8 olarak tespit edilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere eğitim regresyon değeri, %91,03; onaylama %86,75 ve test sonucu ise %84,26 olarak tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, sisteme tahmin etmesi için hedef fonksiyon belirtilmeden tanımlanan girdi

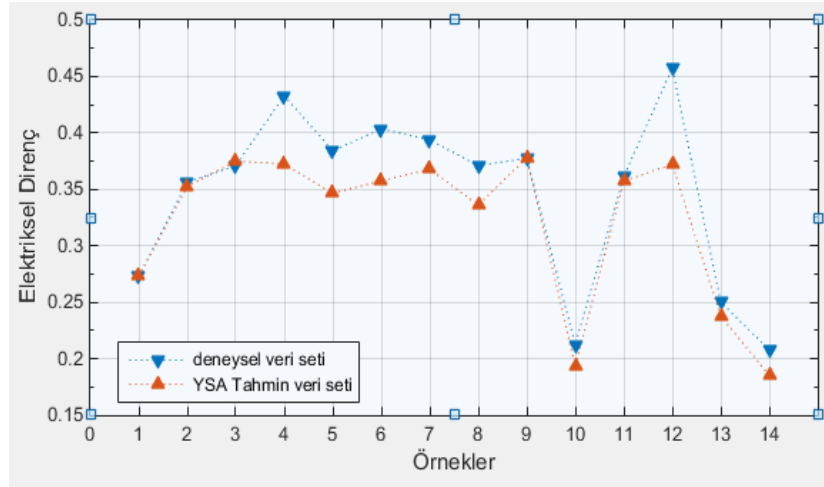
verileri ile 14 adet elektriksel direnç değışken değerin tahin etmesi istenmiştir. Bu işlem sonucunda, YSA Toolbox'ında tanımlanan 14 adet girdi verisi ve sonucunda elde edilen tahmin verileri Tablo 1'de ifade edilmiş ve grafikte gösterilmiştir. Tablo 1'deki verilerin ortalama hata kareleri hesaplandığında elde edilen sonuç 0,00125 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada YSA'nın tahmin ettiği verilerin, gerçek literatür verilerine çok yakın olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1: Eğitim-Onaylama-Test Regresyon Eğrileri

Tablo 1: Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Deneysel	Tahmin
0,27306	0,27294
0,35633	0,35248
0,37102	0,37508
0,43306	0,37236
0,38408	0,34651
0,40367	0,35765
0,39388	0,36781
0,37102	0,33604
0,37755	0,37791
0,21265	0,19334
0,36122	0,35709
0,45755	0,37236
0,25020	0,23778
0,20776	0,18532



Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında hazırlanmıştır (Proje No: 115M579). Bu çalışmanın gerçekleşmesi için bizlere bu olanağı sunan TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- [1] Najafi, H. and Woodbury, K. A. 2013. "Optimization of a Cooling System Based on Peltier Effect for Photovoltaic Cells", *Solar Energy*, 91, 152-160.
- [2] Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y., "Forecasting with Artificial Neural Networks: The State of the Art", *Inter. Journal of Forecasting*, Cilt 14, 35-62, 1998.
- [3] Koç M.Levent, Balas E. Can, Arslan A., İMO Teknik Dergi, 2004 3351-3375, Yazı 225 Taş Dolgu Dalgakıranların Yapay Sinir Ağları ile Ön Tasarımı
- [4] P.Ganesan, S.Rajakarunakaran, M. Thirugnanasambandam, D. Devaraj, *Artificial Neural Network model to predict the diesel electric generator performance and exhaust emissions* *Energy* 83 (2015) 115e124
- [5] Felgner, F., Exel, L., Nesarajah, M. and Frey, G. 2014. "Component-Oriented Modeling of Thermoelectric Devices for Energy System Design", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (3), 1301-1310.
- [6] Kim, S. 2013. "Analysis and Modeling of Effective Temperature Differences and Electrical Parameters of Thermoelectric Generators", *Applied Energy*, 102, 1458-1463.
- [7] Martin, J., Tritt, T. and Uher, C. 2010. "High Temperature Seebeck Coefficient Metrology", *Journal of Applied Physics*, 108, 121101.
- [8] Gou, X., Xiao, H. and Yang, S. 2010. "Modeling, Experimental Study and Optimization on Low-Temperature Waste Heat Thermoelectric Generator System", *Applied Energy*, 87, 3131-3136.
- [9] Kim, R. and Lundstrom, M. S. 2011. "Computational Study of the Seebeck Coefficient of One-Dimensional Composite Nano-Structures", *Journal of Applied Physics*, 110, 034511.
- [10] Dresselhaus, M. S., Chen, G., Ren, Z. F., Dresselhaus, G., Henry, A. and Fleurial, J.-P. 2009. "New Composite Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications", *JOM The Member Journal of TMS*, 61 (4), 86-90.
- [11] Chubilleau, C., Lenoir, B., Candolfi, C., Masschelein, P., Dauscher, A., Guilmeau, E. and Godart, C. 2014. "Thermoelectric Properties of $\text{In}_{0.2}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ Skutterudites with Embedded Pbte or Zn Nanoparticles", *Journal of Alloys and Compounds*, 589, 513-523.
- [12] Fausett, L.(1994), *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications*, Prentice Hall.

- [13] Coşkun HAMZAÇEBİ ve Fevzi KUTAY Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der Cilt 19, No 3, 227-233, 2004 Yapay Sinir Ağları İle Türkiye Elektrik Enerjisi Tüketiminin 2010 Yılına Kadar Tahmini
- [14] Emre Çınar, 2013, Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Elektro-Eğirme Yöntemiyle Bor Katkılı $\text{Bi}_2\text{M}_3\text{Co}_2$ Oksit, (M= Sr, Ca, Ba) Termoelektrik Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu
- [15] Walia, S., Balendhran, S., Nili, H., Zhuiykov, S., Rosengarten, G., Wang, Q. H., Bhaskaran, M., Sriram, S., Strano, M. S. and Kalantar-zadeh, K. 2013. "Transition Metal Oxides - Thermoelectric Properties", Progress in Materials Science, 58, 1443-1489.
- [16] Lee, G. W., Kim, J. Y., Athar, T., Kim, S. J., Seo, W. S. and Park, K. 2013. "Electrical Conductivity and Thermoelectric Power Studies of Solution-Combustion-Processed $\text{Ca}_{2.76}\text{Cu}_{0.24}\text{Co}_4\text{O}_9$ ", Ceramics International, 39, 1397-1402.
- [17] Su, H., Jiang, Y., Lan, X., Liu, X., Zhong, H. and Yu, D. 2011. " $\text{Ca}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Co}_4\text{O}_9$ and $\text{Ca}_{1-y}\text{Sm}_y\text{MnO}_3$ Thermoelectric Materials and Their Power-Generation Devices", Phys. Status Solidi A, 208 (1), 147-155.
- [18] Zhang, F. P., Lu, Q. M. and Zhang, J. X. 2009. "Synthesis and High Temperature Thermoelectric Properties of $\text{Ba}_x\text{Ag}_y\text{Ca}_{3-x-y}\text{Co}_4\text{O}_9$ Compounds", Journal of Alloys and Compounds, 484, 550-554.
- [19] Zhang, F. P., Zhang, X., Lu, Q. M., Zhang, J. X., Liu, Y. Q. and Zhang, G. Z. 2011. "Effects of Pr Doping on Thermoelectric Transport Properties of $\text{Ca}_{3-x}\text{Pr}_x\text{Co}_4\text{O}_9$ ", Solid State Sciences, 13, 1443-1447.
- [20] Matsubara, I., Funahashi, R. Takeuchi, T. and Sodeoka, S. 2001. "Thermoelectric Properties of Spark Plasma Sintered $\text{Ca}_{2.75}\text{Gd}_{0.25}\text{Co}_4\text{O}_9$ Ceramics", Journal of Applied Physics, 90 (1), 462-465.
- [21] Wang, D., Chen, L., Yao, Q and Li, J. 2004. "High-Temperature Thermoelectric Properties of $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ with Eu Substitution", Solid State Communications, 129, 615-618.
- [22] Wang, D., Chen, L., Wang, Q and Li, J. 2004. "Fabrication and Thermoelectric Properties of $\text{Ca}_{3-x}\text{Dy}_x\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ System", Journal of Alloys and Compounds, 376, 58-61.
- [23] Wang, D.-L., Chen, L.-D., Bai, S.-Q. and Li, J.-G. 2004. "Effects of Sm Doping on the High Temperature Thermoelectric Properties of $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ -based Compounds", Journal of Inorganic Materials, 19 (6), 1329-1333.
- [24] Liu, H. Q., Zhao, X. B., Zhu, T. J., Song, Y. and Wang, F. P. 2009. "Thermoelectric Properties of Gd, Y Co-doped $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta}$ ", Current Applied Physics, 9, 409-413.
- [25] Song, Y. and Nan, C.-W. 2011. "High Temperature Transport Properties of Ag-added $(\text{Ca}_{0.975}\text{La}_{0.025})_3\text{Co}_4\text{O}_9$ Ceramics", Physica B, 406, 2919-2923.

- [26] Wang, Y., Sui, Y., Cheng, J., Wang, X. and Su, W. 2009. “Comparison of the High Temperature Thermoelectric Properties for Ag-doped and Ag-added $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ ”, *Journal of Alloys and Compounds*, 477, 817-821.
- [27] Lim, C.-H., Choi, S.-M., Seo, W.-S. and Park, H.-H. 2012. “A Power-Generation Test for Oxide-Based Thermoelectric Modules Using p-Type $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ and n-Type $\text{Ca}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{MnO}_3$ Legs”, *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1247-1255.
- [28] Van, N. N. and Pryds, N. 2013. “Nanostructured Oxide Materials and Modules for High-Temperature Power Generation from Waste Heat”, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 4, 023002.