

## Bölüm 10

# ENERJİ DEPOLAMA

## Chapter 10

# *ENERGY STORAGE*

Kamil KAYGUSUZ - Mehmet Akif EZAN

### BÖLÜM İÇERİĞİ

- 10.1. Giriş
- 10.2. Enerji Depolama Sistemleri
- 10.3. Elektrik Enerjisinin Depolanması
- 10.4. Isıl Enerji Depolama Sistemleri
- 10.5. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri
- 10.6. Yenilenebilir Enerji ve İstihdam
- 10.7. Sonuçlar
- 10.8. Kaynaklar

## YAZARLAR HAKKINDA / ABOUT AUTHORS

**Prof. Dr. Kamil Kaygusuz / Karadeniz Teknik Üniversitesi / kamilk[at]ktu.edu.tr / ORCID: 0000-0001-8364-2794**

Dr. Kamil KAYGUSUZ; 1963 yılında Trabzon da doğdu. 1980 yılında girdiği Konya Selçuk Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünden 1984 yılında Kimya Mühendisi olarak mezun oldu. 1985 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Bölümünde yüksek lisansa başladı ve Nisan 1986 yılında aynı bölümde Fizikokimya Kürsüsünde asistan oldu. 1988 yılında yüksek lisansını tamamladı ve aynı yıl doktora başladı. Nisan 1993 yılında doktorasını tamamladı. Nisan 1994 de Yrd. Doçent ve aynı yılın Ekim ayında da Doçent oldu. 2000 yılının Nisan ayında da Profesör oldu. Rektör yardımcılığı, Enstitü Müdürlüğü ve Anabilim Dalı Başkanlığı gibi idari görevlerde de bulundu. Uzmanlık alanı; temel İşlemler ve Termodinamik, Kimyasal Kinetik, Kimyasal Denge, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Enerjinin Depolanması, Enerji Politikaları, Enerji ve Çevre İlişkisidir. Uluslararası Bilim Atf İndeksi (SCI) tarafından taranan dergilerde yayımlanmış 144 adet yayını ve 70 adet de uluslararası bildirisi vardır. Bu yayımlara başkalarının verdiği atıf sayısı 5200 olup h-faktörü de 43 dir. 2012 yılında Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) ya Asli Üye olarak seçilmiştir. 2017 yılında “Bilime Yön Veren 100 Türk” listesinde yer almıştır. Nisan 2020 yılında Amerika ve Hollanda’dan bilim insanlarından oluşan ekibin, “Kompozit İndikatör Bilimsel Etki İndeksi” ni kullanarak dünyada saygın on bin bilim adamından seçerek en saygın ve etkili beş bin bilim adamı listesini oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu listeye göre “Enerji ve Kimya Mühendisliği” dallarında en etkili 250 Bilim Adamı Listesine girmeyi başarmıştır. En son 2021 yılı Nisan ayında da h-faktörleri dikkate alınarak yapılan “Kimya Bilimine Yön Veren 100 Türk” listesinde yer almıştır. Evli ve iki erkek çocuk babası olan Prof. Dr. Kamil Kaygusuz; İngilizce ve Arapça Bilmektedir.

**Prof. Dr. Kamil Kaygusuz / Karadeniz Technical University / kamilk[at]ktu.edu.tr / ORCID: 0000-0001-8364-2794**

Professor Kamil Kaygusuz currently a research professor of chemical engineering at the Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey. In 1984, after graduation from the Selçuk University, Konya, Turkey, he accepted a research assistant position at the Karadeniz Technical University, where he developed a renewable energy laboratory and conducted research on renewable energy and energy storage. He received his MS in chemical and mechanical engineering in 1988 from the Karadeniz Technical University at the Department of Chemical and Mechanical Engineering. He received his Ph.D. in Mechanical Engineering in 1993 from the Karadeniz Technical University. In 2000, he was awarded a professor in physical chemistry from the Karadeniz Technical University, Department of Chemistry. During his 20 years of tenure at that University, he did research on thermodynamics, energy storage, and renewable energy. He published 200 scientific papers related to energy storage and renewable energy sources. He also a member of the Turkish Academy of Science.

**Doç. Dr. Mehmet Akif Ezan / Dokuz Eylül Üniversitesi / mehmet.ezan[at]deu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-5966-9791**

Doç. Dr. Mehmet Akif Ezan 2014 yılından bu yana Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Termodinamik programında öğretim üyesi görev yapmaktadır. Lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini aynı üniversiteden sırasıyla 2004, 2006 ve 2011 yıllarında almıştır. YÖK bursuyla 2010-2011 yılları arasında University of Ontario Institute of Technology, Kanada’da doktora sırası araştırmalarda bulunmuştur. Isıl sistemlerin sayısal ve deneysel incelenmesi üzerine araştırmalar yürütmektedir. Başlıca çalışma konuları faz değişimli ısı enerji depolama sistemleri, doğal taşınım tahrikli erime / katılaşma prosesleri, faz değişim malzemelerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu, hidrojen depolama, entegre fotovoltaik / termal sistemlerdir. Türkiye Bilimler Akademisi Enerji Çalışma Grubu tarafından hazırlanan faaliyetlerde ve teknik çalıştay raporlarında aktif görev almaktadır.

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif Ezan / Dokuz Eylul University / mehmet.ezan[at]deu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-5966-9791**

Assoc. Dr. Mehmet Akif Ezan has been working as a faculty member at Dokuz Eylul University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Thermodynamics program, since 2014. He received bachelor's, MSc, and Ph.D. degrees from the same university in 2004, 2006, and 2011. He visited the University of Ontario Institute of Technology, Canada, between 2010 and 2011 as a researcher with the YÖK scholarship. He conducts research on the numerical and experimental investigation of thermal systems. His main fields of study are phase-change thermal energy storage systems, natural convection-driven melting / solidification processes, development and characterization of phase change materials, hydrogen storage, integrated photovoltaic / thermal systems. He takes an active role in the activities and technical workshop reports prepared by the Turkish Academy of Sciences Energy Working Group.

## Özet

Bu bölümde enerji depolama tekniklerinin önemi, temel mekanizmaları, faydaları ve depolama yöntemlerinin uygulamaları detaylı olarak sunulmaktadır. Enerjinin istenildiği zamanda ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması beklenmektedir. Basit olarak tanımlamak gerekirse, enerjinin istediğimiz zamanda kullanılmak üzere biriktirilmesine *enerji depolama* denilmektedir. Mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve ısı olmak üzere farklı formlarda enerji depolanabilmektedir. Enerji depolama gelişmiş bir enerji teknolojisi olup arz güvenliğinin yanı sıra mevcut enerji sistemlerinin ve büyük ölçekli enerji aktarımı yapan ekipmanların hem ekonomik ve verimli olarak işletilmesinde hem de etkili bir şekilde kullanılmasında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Yer altında doğal gaz depolama ile arz güvenliği temini sağlanırken, yüksek basınçta hidrojen depolama ile yeni nesil ve temiz ulaşım çözümlerine imkân sağlanmaktadır. Mahal ısıtma/soğutma uygulamaları ve sıcak su sistemlerinde güneş enerjisinin duyulur ve/veya gizli formda depolanması kullanılırken, rüzgâr santrallerinin süreksizliğinin ortadan kaldırılmasında batarya teknolojisi veya elektrik-ısı/ısı-elektrik depolama çözümleri uygulanmaktadır. Enerji temini yıl boyunca kullanıcılara güvenilir enerji servisi sağlayan karmaşık bir görevdir. Enerji sağlama ve kullanımında önemli bağımlılıklar, mevsimlik farklar ve tüketimdeki günlük dalgalanmalar enerji kaynaklarının karmaşık yönetimine ihtiyaç duyar. Diğer taraftan enerjinin dönüşümü ya da dağıtımı ve enerjinin zaman zaman kesilmesinden dolayı tüm sektörlerde sürekli olarak enerji sağlamayı garanti etme işi çok kritik bir öneme sahiptir. Dolayısıyla enerji arz ve talep arasındaki bu dengeyi sağlamada enerji depolama önemli bir rol oynar.

## Anahtar Kelimeler

Enerji Depolama, Mekanik Enerji Depolama, Pompalı Depolama, Isıl Enerji Depolama, Faz Değişim Malzemesi, Elektrokimyasal Depolama, Doğal Taşınım

## Abstract

In this chapter, the importance, fundamental mechanisms and benefits of energy storage techniques and applications of the different storage methods are represented in detail. It is expected to make the energy ready to use whenever and wherever it is requested. Energy storage is defined as the accumulation of energy for further usage when the demand arises. Energy can be stored one of the following forms mechanical, chemical, electrical, electrochemical or thermal. Energy storage is an advanced energy technology application that provides a significant potential for not only securing the reliability of the energy supply but also the operation of the energy transportation systems and their components more effectively, efficiently and economically. While underground storage of natural gas can provide the reliability of the energy supply, the storage of high-pressure hydrogen can help to put in practice new generation clean transportation options. The sensible and/or latent heat thermal energy storage applications are used to store the solar energy in space heating/cooling and hot water supply systems. The battery technology and electric to heat/heat to electric storage techniques are used to resolve the intermittency of the wind farms and maintain sustainable energy production. Supplying reliable energy to the end-users throughout a year is a complex mission that includes the management of the seasonal variations in energy supply, daily fluctuations in energy production and the demand. On the other hand, it is critical to guarantee a continuous power supply without any interruption for industrial and household usage. That is the storage of energy has an essential and critical role in maintaining a balance between the demand and the supply.

## Keywords

Energy Storage, Mechanical Energy Storage, Pumped Storage, Thermal Energy Storage, Phase Change Materials, Electrochemical Storage, Natural Convection

## 10.8. KAYNAKLAR / REFERENCES

- [1] BP, Energy Outlook, 2019 Edition. (<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>)
- [2] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu”, (2018-2022) Mayıs 2018.
- [3] BP, Statistical Review of World Energy, 2016 Edition.
- [4] A. Çaliker, E. Özdemir, “Modern Enerji Depolama Sistemleri ve Kullanım Alanları”, 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK’2013, 23-24 Mayıs 2013, Kocaeli, 2013.
- [5] I. Dinçer, M.A. Rosen, Thermal Energy Storage: Systems and Applications, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley, 2011.
- [6] A.K.Y. Yoon, H.S. Noh, Y.S. Yoon, Analysis of Vanadium Redox Flow Battery Cell with Superconducting Charging System for Solar Energy, Electrical and Electronic Engineering 6 (2016) 1-5.
- [7] D. Turan, A. Yönetken, Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 16 (2016) 113-121.
- [8] IHA, International Hydropower Association, Hydropower Status Reports: Sector Trends and Insights, 2019.
- [9] R. Jamil, I. Jamil, Z. Jinquan, M. Li, J. Qirong, R. Jamil, Development Trend of Chinese Hydroelectric Generation Technology of Hydro Power Plant (HPP), International Journal of Engineering Works, Kambohwell Publisher Enterprises 1 (2014) 1-5.
- [10] I. Dincer, M.A. Ezan, Heat Storage: A Unique Solution for Energy Systems. Springer, 2018.
- [11] Y.A. Çengel, J.M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 4<sup>th</sup> Edition in SI Units, McGraw-Hill Education, 2019.
- [12] N. Armaroli, V. Balzani, Towards an Electricity-powered World, Energy & Environmental Science 4 (2011) 3193-3222.
- [13] N. Hamsic, A. Schmelter, A. Mohd, E. Ortjohann, E. Schultze, A. Tuckey, J. Zimmermann, Stabilising the Grid Voltage and Frequency in Isolated Power Systems Using a Flywheel Energy Storage System. In The Great Wall World Renewable Energy Forum 23-27th October 2006, Beijing, China, 2006.
- [14] H. M. Ettouney, I. Alatiqi, M. Al-Sahali, S.A. Al-Ali, Heat Transfer Enhancement by Metal Screens and Metal Spheres in Phase Change Energy Storage Systems, Renewable Energy 29 (2004), 841-860.
- [15] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on Storage Materials and Thermal Performance Enhancement Techniques for High Temperature Phase Change Thermal Storage Systems, Renewable And Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 2118-2132.
- [16] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 251-283.
- [17] M. A. Ezan, A. Ereğ, I. Dincer, Energy and Exergy Analyses of an Ice-On-Coil Thermal Energy Storage System, Energy 36 (2011) 6375-6386.
- [18] M.A. Ezan, C. Yüksel, E. Alptekin, A. Yılançı, Importance of Natural Convection on Numerical Modelling of the Building Integrated PVP/PCM Systems, Solar Energy 159 (2018) 616-627.
- [19] A. Sarı, Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar”, Kimya Lisans Öğrencileri Araştırma Projesi Çalıştayı, 20-28 Temmuz, Çanakkale, 2011.
- [20] P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rougé, M. Cabassud, P. Cognet, A Review on High Temperature Thermochemical Heat Energy Storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014) 591-610.
- [21] M. Levy, R. Levitan, H. Rosin, R. Rubin, Solar Energy Storage via a Closed-Loop Chemical Heat Pipe, Solar Energy 50(2) (1993) 179-189.
- [22] E. Alptekin, M.A. Ezan, Performance Investigations on a Sensible Heat Thermal Energy Storage Tank with a Solar Collector Under Variable Climatic Conditions, Applied Thermal Engineering, 164 (2020) 114423.
- [23] A.E. Gençer, Numerical Simulation of Phase Change with Natural Convection inside an Annular Space, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ekim 2019.
- [24] BP, Statistical Review of World Energy, 2019 Edition.

- [25] O. Erdiñ, BP, Yenilenebilir Enerji, Akıllı Şebekeler ve Enerji Verimliliği, Sürdürülebilir Şehirler Eđitimi, İstanbul, 1-2 Ağustos, 2017.
- [26] Deloitte, Biyokütlenin Altın Çağı, 2014.
- [27] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Yenilenebilir Enerji ve İstihdam: Yıllık Görünüm 2018, Mayıs 2018.

### Önerilen Kaynaklar

- [1] Barbir, F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Elsevier/Academic Press, 2005.
- [2] M. Semadeni. Storage of energy, overview. In “Encyclopedia of Energy”, vol.5, p. 65-78, Elsevier, 2004.
- [3] I. Dinçer. Thermal energy storage. In “Encyclopedia of Energy”, vol.5, p. 719-738, Elsevier, 2004.
- [4] H. Öztürk. Isı depolama tekniği. Teknik Yayınevi, Ankara, 2009.
- [5] H. P. Garg., S.C. Mullick., A.K. Bhargava. Solar thermal energy storage. D. Reidel, Boston, 1985.
- [6] G.A. Lane (Ed.). Solar heat storage: Latent heat materials, Vol. I, CRC Press, Boca Raton, 1986.
- [7] G.A. Lane (Ed.). Solar heat storage: Latent heat materials, Vol. II, CRC Press, Boca Raton, 1986.
- [8] L.F. Cabeza (Ed.). Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. Elsevier, 2015.
- [9] D. Y. Goswami. Principles of Solar engineering. 3th ed. CRC Press, Boca Raton, 2015.
- [10] J.A. Duffie., W.A. Beckman. Solar engineering of thermal processing.
- [11] S. Kalaiselvam., R. Parameshwaran. Thermal energy storage Technologies for sustainability: system design, assessment and applications. Elsevier/AP, 2014.
- [12] P.W. Li., C.L. Chan. Thermal energy storage: analysis and design. Elsevier/AP, London, 2017.
- [13] Broussely, M., Pistoia, G., Industrial Applications of Batteries, Chapter 2, Elsevier, UK, 2007
- [14] Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J. Energy storage systems: characteristics and Comparisons”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008; 12: 1221–1250.
- [15] Abhat, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar Energy, 1983; 30: 313–332.
- [16] Cabeza, L., Castell, A., Barreneche, C., Gracia, AD., Fernández, A. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011; 15: 1675-1695.
- [17] Linden, D., Reddy, TB. Handbook of Batteries, Chapter 30, M. Fetcenko, McGraw-Hill, New York, USA, 2002.
- [18] Yılmazoğlu, MZ. Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması. Politeknik Dergi, 2010; 13: 33-42.
- [19] Mert, MS., Sert, M., Mert, HH. Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değiştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2018; 6(1): 161-174.
- [20] Kılış, B., Kakaç, S (Eds.). Energy Storage Systems. NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [21] Khartchenko, NV., Kharchenko, VM. Advanced Energy Systems. Second Edition, CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, 2014.
- [22] Paksoy, HO (Ed.) Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design. NATO Science Series, Springer, 2007.