



TMMOB ÇEVRE MÜHENDİSLERİ ODASI

SU ARITIMINDA NANOPOR TİTANYUM DİOKSİTİN FOTOKATALİTİK/FOTOELEKTROKATALİTİK PROSESLERİNDE KULLANILMASI

Yiğit Zehra¹, İnan Hatice¹, Selçuk Hüseyin²

1. Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir
2. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Denizli

ÖZET - Alternatif enerji kaynakları fosil yakıt harici enerji kaynaklarını kapsamaktadır. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan kirlilikten ötürü bu alana ilgi her geçen gün artmaktadır. Çevreye daha az zararlı birçok alternatif enerji kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan öne çıkan en önemli kaynak güneş enerjisi olarak görünmektedir. Güneş enerjisi, su ve atıksu arıtımı alanında da uygulama alanı bulmaktadır. Doğal (güneş) veya yapay bir kaynaktan elde edilen UV ışınları ve Titanyum dioksit (TiO₂) gibi yarı iletken katalizörler ile kirleticilerin parçalanıp yok edilmesine fotokatalitik proses denilmektedir. Bu fotokatalitik (FK) prosesin uygun elektrik alanıyla birleştirilmesiyle fotoelektrokatalitik (FEK) prosesler elde edilmektedir ve bu teknolojideki uygulamalar giderek artmaktadır. Burada fotokatalitik ve fotoelektrokatalitik proseslerin tanımlaması ile su ve atıksu arıtımı alanında uygulama alanları üzerinde bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif enerji, fotokatalitik arıtma, fotoelektrokatalitik arıtma, nanopor titanyum dioksit, su arıtımı.

ABSTRACT - Alternative energy refers to energy sources which aren't based on the burning of fossil fuels. The renewed interest in this field of study comes from the undesirable effects of pollution from burning fossil fuels. Fortunately there are many alternative energy which sources have less damaging impacts on our environment. Solar energy is one the most resourceful sources of energy for the future. Destruction of pollutants by UV-ray supplied from natural (sun) or artificial sources and semi-conductor catalysts like TiO₂ is called photocatalytic process. Photoelectrocatalytic processes are obtained by combining photocatalytic process with proper electrical field and application of this new technology is spreading. Photocatalytic and photoelectrocatalytic processes are described and information about the application area on water and wastewater treatment is given.

Keywords - Alternative energy, photocatalytic treatment, photoelectrocatalytic, titanium dioxide, water treatment

GİRİŞ

Dünyadaki fosil yakıtların sınırlı olması nedeniyle alternatif enerjilerin geliştirilmesi üzerine çok yoğun çalışmalar yapılmıştır. Alternatif enerjiler içerisinde çevresel kirlilik problemleri açısından en temiz ve de en ucuz güneş enerjisidir. Su dezenfeksiyonunda güneşin kullanılması kolay, sürdürülebilir ve düşük maliyetlidir.

Solar dezenfeksiyon ve ileri oksidasyon prosesleri yerinde uygulanabilen, tesis gerektirmeyen, düşük maliyetli ve küçük miktardaki içme suyu dezenfeksiyonunda etkin olmasından dolayı çok başvurulan su arıtma yöntemlerinden birisidir. Suyun dezenfeksiyonu için solar ışınım (SI) uzun yıllardır kullanılan bir metoddur. Solar ışınım, özellikle UV-A(310-400 nm) altında birkaç saat güneşe maruz kaldıktan sonra bakteri ve virüsleri inaktive edip yok etmektedir. Kızılötesi ışınım (700 nm'den büyük) suyun sıcaklığını artırmakta (50-55 °C' ye kadar) ve böylece bu metodun etkinliğini artırmaktadır. Bu teknolojiye bakteriler üzerinde UV-A ışınımının etkisini hızlandıran, ek olarak kimyasal kirleticileri parçalayan ve mikroorganizmalar için oldukça toksik olan hidroksil radikalleri gibi oksitleyici türleri üreten titanyum dioksit (TiO₂) parçacıkları kullanılmaktadır. Titanyum dioksit süspansiyon halde veya yüzeye kaplanmış bir film tabakası halinde suyla temas ettirilerek arıtım amaçlı kullanılmaktadır.

Bilim ve mühendislikte nanoteknolojinin gelişimiyle nanoçözücüler, nanokatalizler, biyoaktif nano parçacıklar, nano yapıdaki katalitik membranların su kalitesiyle ilgili birçok problemi çözmeye yönelik uygulamaları yapılmaktadır (Savage ve Diallo, 2005). Nano boyuttaki TiO₂'in su ve atıksu arıtımında kullanılması uygulamalardan biridir. Bu çalışmada, su Arıtımında Nanopor Titanyum Dioksitin Fotokatalitik (FK) ve Fotoelektrokatalitik (FEK) Prosesleri ve bunların uygulamalarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

FOTOKATALİZÖR OLARAK TiO₂

TiO₂ ucuz, stabil olması ve sudaki zararlı organik bileşikler UV ışınlaması altında oksijen, su ve CO₂ gibi zararsız bileşiklere dönüştürmesi nedeniyle literatürde en çok kullanılan yarı iletken madde olup Avrupa ve ABD'inde içme suyunda dezenfeksiyon ve organik madde arıtımı amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Titanyum dioksit su dezenfeksiyonunda ileri oksidasyon süreçlerinde katalizör olarak kullanılır. TiO₂'in tehlikeli organik kimyasalları ve bazı inorganik kirleticileri azaltımı araştırılmıştır. TiO₂ anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç farklı kristal yapıda bulunmaktadır. Optik özellikleri, donukluk, dayanıklılıktan dolayı anataz ve rutil yapıda olanlar fotokatalitik amaçlarda kullanılmaktadırlar.

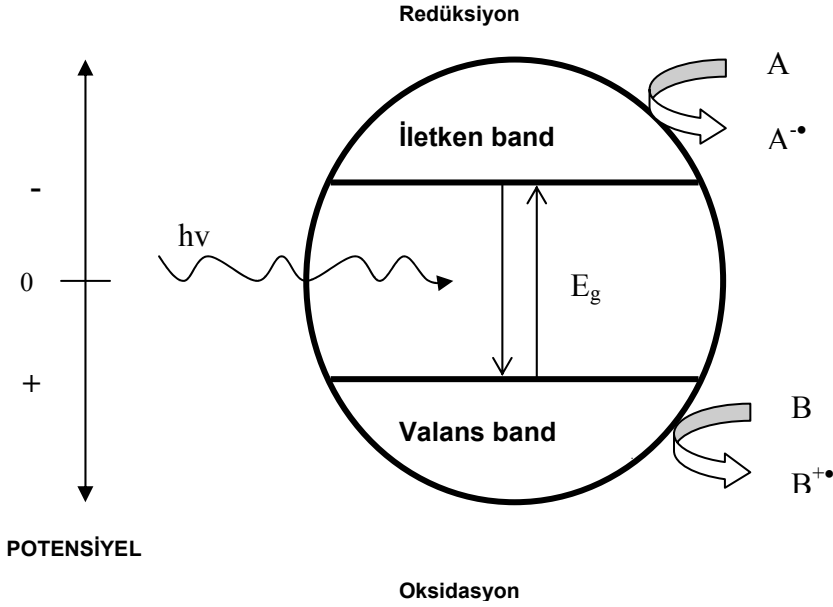
Titanyum dioksit özellikle anataz formundadır ve ultraviyole ışık altında fotokatalizör olarak davranır. Titanyum dioksitin pozitif hollerinin güçlü yükseltgeyici potansiyeli suyu oksitleyerek hidroksil radikalini oluşturur. Aynı zamanda, direk olarak organik maddeyi ve oksijeni oksitleyebilir.

TiO₂/UV fotokatalitik oksidasyon prosesi temel olarak solar enerji (hv) ile TiO₂ yüzeyinde elektron (e⁻) ve hol (h⁺) çiftinin ayrılarak katalizör yüzeyindeki maddeler ile çeşitli reaksiyonlar vermesine dayanmakta ve temel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi TiO₂ içerisinde bir çift halde bulunan hol (h⁺) ve elektronlar (e⁻) TiO₂

yüzeysolar enerjiye (hv) maruz kaldığında elektron (e⁻) iletken (conduction) banta geçer ve hol valans bantta kalır. İletken banttaki elektron ve iletken bantta serbest kalan holler Denklem 1'de verilen reaksiyon ile katalizör yüzeyinde hidroksil radikali (HO•) oluşturabilirler. Titanyum dioksit bünyesinde gerçekleşen olaylar Denklem 2-6'da ifade edilmiştir.

Fotokatalitik sistemler, güneş enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşümü olarak tanımlanabilir. Bu dönüşüm sırasında hidroksil radikali oluşur. Bu radikal çok güçlü bir oksitleyicidir ve sudaki pek çok organik kirletici maddelerle reaksiyona girerek organik maddelerin CO₂'ye oksidasyonunda önemli rol oynar (Bekbölet ve Özkösem, 1996). Buna karşın süspansiyon haldeki TiO₂'in sudan ayrılmasının zor olması ve solar enerjinin maksimum %10'unun TiO₂'in yüzeyinde absorblanması, TiO₂ bazlı fotokatalitik arıtma sistemlerinin dezavantajlarıdır (Palmer vd., 2002; Shaphard vd., 2002).



Şekil 1: Fotokatalitik arıtma sistemlerinin genel mekanizması
(A, indirgenebilir ve B, oksitlenebilir maddeler).



e reaksiyonları:



h+ reaksiyonları:



Literatürde nano boyuttaki TiO_2 partikülleri çeşitli yüzeylere çok farklı kaplama metotları ile çeşitli yüzeylere tutturularak kullanılması TiO_2 partiküllerinin sudan tekrar ayrılması problemini ortadan kaldırmıştır. Fakat TiO_2 immobilize edilmiş bu yüzeylerin hava ve su kirliliği uygulamasında TiO_2 'nin sudan ayrılması problemini çözse de bu TiO_2 'nin solar enerjiyi kullanma potansiyelini azaltmıştır. (Vinodgopal vd., 1994).

TiO_2 in sabitlenmesinden dolayı kirlenmelerle temas alanı azalmakta ve böylece film halindeki TiO_2 süspansiyon haldeki TiO_2 'e göre daha az etkin gibi görünmesine rağmen solar dezenfeksiyonla beraber

avantajlara sahiptir. TiO_2 'in süspansiyon halde kullanılmamasına rağmen bakteriyal kirlenmeler için dezenfeksiyon zamanını azaltma ve basit solar dezenfeksiyonda bozunamayan kimyasalları yok etme gibi avantajları vardır.

Çeşitli yüzeylerde TiO_2 filmi oluşturmak kaplama ve aktivasyon olmak üzere iki adımda gerçekleşmektedir. İlk kaplama aşaması titanyumun çeşitli yüzeylere tutturulması ile gerçekleşirken ikinci aşamada ise yüzeylere tutturulmuş titanyumun oksitlenerek TiO_2 oluşturulmasıyla aktivasyonu gerçekleşmektedir. Bundan dolayı pek çok araştırma yüzey kaplama metodları geliştirilerek fotokatalitik arıtma veriminin iyileştirilmesine odaklanmıştır. Bunlar arasında daldırma kaplama, sol-gel metodu, Teflon reaktörde film oluşturma, katalitik buhar yöntemi ile oksit tabakası oluşturma, elektrokimyasal, termal, elektroforetik, spray kaplama, lazer kaplama, hidrotermal kaplama literatürde geliştirilen kaplama yöntemleridir (Matthews vd., 1988; Zeltner vd. 1993; Mikula vd., 1992; Fernandez vd., 1995). İnce şeffaf filmlerle fotokatalitik çalışmalarda önemli olan; kaplama çözeltisi içerisinde disperse olan TiO_2 partiküllerinin, kaplamanın yüzeyine taşınarak, yüzeyin hidrofilik ve fotokatalitik özellik kazanmasının sağlanmasıdır. (Sayılkan v.d., 2006)

Bu adımlar sonucunda; elde edilecek filmin fotokatalitik verimi;

- a) TiO_2 nano partiküllerinin enerji ve kristal yapısına,
- b) oluşturulan filmin porozitesine,
- c) Nano partiküllerinin ve filmin boyut ve morfolojik yapısına,
- d) Kaplanılan malzemenin özelliğine bağlıdır.

Fotokatalitik verimin artırılması için en önemli gelişme fotoelektrokatalitik (FEK) proses fikridir. (Fujishima ve Honda, 1972) FEK prosesi temel olarak yüzeyleri TiO_2 filmi ile kaplı elektrotların elektrokimyasal arıtma sistemi içerisinde fotokatalitik olarak kullanılması olarak tanımlanabilir. Son yıllarda yapılan çalışmaların hepsi FEK prosesinin suların arıtılması ve dezenfeksiyonu hususunda fotokatalitik prosese göre çok daha verimli olduğunu göstermiştir (Kim ve Anderson, 1994; Vinodgopal vd., 1994; Pelegrin vd. 2000; Harper vd., 2001; Li vd., 2002; Zannoni vd., 2003).

SU ARITIMINDA FOTOKATALİTİK PROSELER

Doğal güneş ışığından sağlanan UV ışınları ile oksijen ve nanopartiküllerden oluşan özel bir kaplama arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda yüzeydeki organik/inorganiklerin parçalanıp yok edilmesine fotokatalitik proses denilmektedir.

Bir fotokatalitik reaktör sistemi istenmeyen kirlenmeleri uzaklaştırmak için bir foton enerji kaynağı içerir. Sistem foton enerji kaynağı yanında ışın dağıtıcı sistem, ve foton enerjisinin taşındığı reaksiyon çemberinden oluşmaktadır. Reaksiyon çemberinden kirli su geçmekte ve burada foton enerjisiyle reaksiyona girerek kirlenici derişimini azaltmaktadır.

Fotokatalitik proseslerin sudan organik ve inorganik kirlenmelerin uzaklaştırılmasında etkin ve ucuz bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Devipriya ve Yesodharan, 2004). Bir çok metal oksidin yarı iletken olduğu bilinmektedir. Bunlar içerisinde fotokatalitik prosesi en uygun aktif yarı iletkenin TiO_2 olduğu belirlenmiştir. TiO_2 , 3,2 eV'luk band aralığı enerjisine sahip olan ve 400 nm'den küçük dalga boylarında UV ışınlanması ile aktive edilen bir yarı iletkenidir. UV ışınlanması sırasında, TiO_2 yüzeyinde kimyasal reaksiyonları başlatma kapasitesine sahip elektronlar ve boşluklar oluşmaktadır.

Fotokatalitik bozunmada, ışık kaynağı olarak UV lambalarının yanı sıra güneş ışığından da yararlanılmaktadır. Güneş ışığı etkisiyle fotokatalizör varlığında kirlenmelerin bozunumu ile ilgili en azından son 30 yıldır bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmesine rağmen, prosesin endüstriyel ve ticari uygulamaları ve mühendislik projelendirme sistemleri yalnızca son yıllarda gelişme göstermiştir. Bu yöntemle su ve atıksuların arıtımı, halen birkaç deneysel işletme ile sınırlıdır. Bu tesislere örnek olarak, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde 1-6 m³/saatlik akış hızları ile işletilen tesisler örnek verilebilir (Balkaya ve Arslan, 2004).

Güneş ışığından yararlanarak sulardaki kirlenmelerin bozunumu diğer arıtım teknolojileri ile kıyaslandığında, dikkate değer ölçüde düşük enerji gereksinimi ve yerinde arıtım imkanı gibi avantajlara sahiptir (Mehos ve Turchi 1993). Çeşitli araştırmacılar tarafından arazide pilot ölçekte gerçekleştirilen çalışmalarda, laboratuvarında UV lambası ile gerçekleştirilen fotokatalitik bozunma çalışmalarında elde edilen verimlere ulaşıldığı literatürlerden bilinmektedir. Bu çalışmalarda ayrıca, doğal ortamda katalizör varlığında güneş ışığı etkisiyle kirlenmelerin bozunumunun yalnızca Akdeniz ülkeleri gibi bol güneş alan

ülkelerde etkin olmadığı, güneşten az veya çok yararlanabilen tüm alanlarda etkili olduğu ifade edilmektedir (Balkaya ve Arslan, 2004).

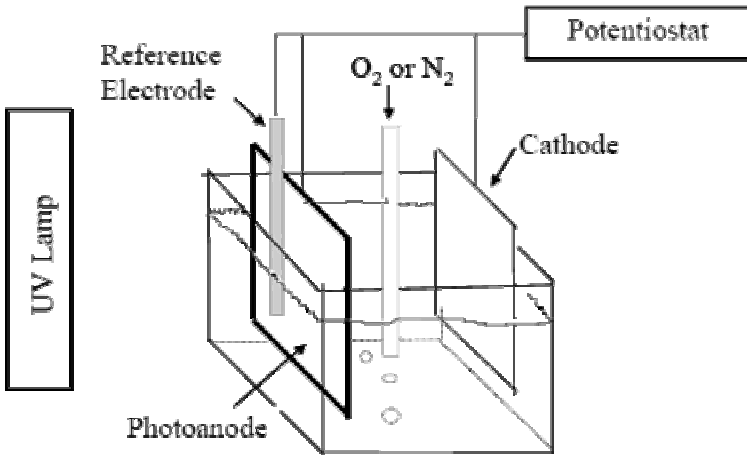
Şimdilerde en önemli çevre problemlerinden birisi atıksu arıtımıdır. J.Araña (2002)'de gerçek bir atıksuya solar TiO_2 - fotokataliz uygulayarak organik maddenin fotokatalitik bozunmasını ozon ve bazı fosfat gibi bazı iyonlar varlığında incelemiştir. Kataliz olarak aktif karbon ve titanyum dioksit karışımını ve ozon kullanarak dezenfeksiyon süresinin 60 dakikadan daha az olduğunu gözlemiştir. Ayrıca 24-48 saat içinde bakterilerin tekrar gözlenmemesi ve ek olarak toplam organik karbonun giderilmesi gözlenmiştir.

UV ışığı ve yarı iletken partiküllerin varlığında kirleticilerin bozunumu yani fotokatalitik bozunma son yıllarda pek çok organik kirleticide olduğu gibi pestisit gideriminde de ümit verici bir yöntem olarak görünmektedir (Devipriya ve Yesodharan, 2004)

SU ARITIMINDA FOTOELEKTROKATALİTİK PROSESLER

Fotokatalitik verimi artırmak için Fujishima ve Honda (1972) fotoelektrokatalitik (FEK) prosesi geliştirilmiştir. FEK prosesi temel olarak TiO_2 gibi fotokatalizörlerin elektrokimyasal arıtma sistemi içerisinde kullanıldığı bir fotokatalitik prosestir.

Son yıllarda yapılan çalışmaların hepsi (Kim ve Anderson, 1994; Pelegrinin vd., 2000; Harper vd., 2001; Li vd., 2002) FEK prosesinin suların arıtılması ve dezenfeksiyonu hususunda fotokatalitik prosese göre çok daha verimli olduğunu göstermiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar anot ve katot kompartimanlarını başka bir deyişle holler ve elektron reaksiyonlarını ayırarak FEK prosesinin çok amaçlı ve daha verimli kullanılabilceğini belirlemişlerdir (Vinodgopal vd., 1994, Zanoni vd., 2003). Daha ileriki çalışmalarda (Selçuk vd. 2003, 2004) FEK prosesinde sol-gel nano teknolojisi ile elektrotlar üzerine immobilize edilmiş TiO_2 kullanmış ve sistemde oluşan hol ve elektronları (artı ve eksi yükler) Şekil 2'deki gibi ayrılarak FEK prosesini bir arıtma prosesi olarak geliştirmişlerdir. Hol ve elektronların ayrıldığı FEK prosesinde elde edilen sonuçlar fotokatalitik arıtmaya ve birleşik FEK sistemine göre çok daha yüksek verimler elde edilmiştir. Bu yanında fotokatalitik sistemden çok farklı olarak, fotoanot kısmında klorür ve bromür iyonlarının oksitlenmesi sonucu bir dezenfektan olan klor ve brom oluştuğu tespit edilmiştir (Zanoni vd., 2004; Selçuk vd., 2004). Sistemin fotoanot kısmında yapılan çalışmalar klorür ve bromür gibi halojenlerin oksitlenmesi sonucunda sistemde zararlı klorlu ve bromürlü bileşiklerin oluşabileceğini, geliştirilen bu prosenin uygulamaya geçmeden çok daha fazla araştırılması ve geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Selçuk vd. 2004).



Şekil 2: Fotoelektrokatalitik sistem

L.Pinhedo(2005)' de humik asidin elektrokimyasal ve fotoelektrokimyasal oksidasyonla bozulması ile ilgili yapmış olduğu çalışmada iki prosesin de humik asidin bozunmasında etkin olduğunu göstermiştir fakat elektrokimyasal oksidasyonda 180 dakikalık reaksiyon süresinde toplam organik karbonun %25'i giderilirken, aynı akım ve aynı reaksiyon süresinde TOK'un % 65'inin giderildiği gözlenmiştir. Fotokatalitik arıtma sisteminde kullanılan reaktörlerin geliştirilmesi ve solar fotoelektrokatalitik (FEK) arıtma sistemi olarak uygulanması çalışmaları henüz yapılmaktadır.

SONUÇ

Nano boyutlu Titanyum dioksit (TiO₂)'in solüsyonda süspansen veya bir yüzeye film halinde sabitlenmiş şekilde fotokatalitik ve özellikle fotoelektrokatalitik sistemlerin su ve atıksu arıtımı alanında kullanımları artan bir oranda denlenmektedir. Bu yapılan çalışmalarda TiO₂'in uygulanabilirliğini engelleyen TiO₂ partiküllerinin kullanıldıktan sonra sudan ayrılması güçlüğü kaplama metotları ile giderilmiştir. Fakat kaplama metodu ile elde edilen filimler TiO₂ nin arıtma verimini artırmamış aksine düşük yüzey alanı nedeniyle arıtma verimi azalmıştır. TiO₂ nin arıtma verimi fotoelektrokatalitik proses ile geliştirilmiştir.

Bu tür sistemlerde enerji ihtiyacını güneşten karşılama şansının olmasının az alan ihtiyacı ve basitliği nedenleri ile gelecek vaad eden arıtma seçenekleri olduğu düşünülmektedir.özellikle Yoğun güneş alan bölgelerimizde elektrik enerjisini güneş enerjisinden sağlayan teknolojilerin kullanılması yaygınlaşmaktadır. İleriye yönelik yeni teknolojilerin öğrenilmesi ve bu konudaki araştırmaların ülkemizde çeşitli alanlarda uygulanabilirliğinin belirlenmesi ileriye yönelik enerji politikalarının geliştirilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmada nano TiO₂ partikülleri fotokatalitik ve fotoelektrokatalitik solar arıtma sistemlerinde su arıtımı amacıyla kullanılması, film yüzeyinde su arıtma maknızması, bu alandaki sistemlerin gelişimi ve karşılaşılan problemler değerlendirilmiştir. Ancak bu sistemler üzerinde daha kapsamlı çalışmalar yapılarak gerçekte karşılaşılabilecek problemlerin pilot ve gerek uygulamaları ile tespit edilmesi gereken başka bir konudur.

KAYNAKLAR

- Araña J., Herrera Melián J.A., Doña Rodríguez J.M., González Díaz O., Viera A., Pérez Peña J., Marrero Sosa P.M., Espino Jiménez V. (2002) "TiO₂-photocatalysis as a tertiary treatment of naturally treated wastewater" *Catalysis Today* 76:279-289
- Balkaya N. Ve Arslan A. (2004) "Sulu Çözeltilerdeki Pestisitlerin Güneş Işığı Etkisiyle Bozunumu", *Ekoloji Dergisi*, 14, 53:18-24
- Bekbolet M. ve Özkösemem G. (1996) "A preliminary investigation on the photocatalytic degradation of a model humic acid" *Water Science Research*, 33:189-194
- Devipriya S. ve Yesodharan S. "Photocatalytic degradation of pesticide contaminants in water" *Solar energy materials and solar cells* 86/3: 309-348
- Fernandez, A., Lassaletta, G., Jimenez, V.M., Justo, A., Gonzalez-Elipse, A.R., Herrmann, J.M., Tahiri, H., Ait-Ichou, Y., *Appl. Catal. B* 7 (1995) 49-63.
- Fujishima, A. ve Honda, K. (1972) "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode" *Nature*, 238, 37-38
- Harper, J.C., Egerton, T.A., Curtis, T.P. ve Gunlazuardi, J. (2001). "Effect of catalyst type on the kinetics of the electrochemical disinfection of water inoculated with E-coli" *Journal of Applied Electrochemistry*, 31:623-628
- Kim, D.H. ve Anderson, M.A. (1994) "Photoelectrocatalytic degradation of formic acid using a porous TiO₂ thin-film electrode" *Environmental Science Technology*, 28:479-483
- Li, X.Z., Li, F.B., Fan, C.M. ve Sun, Y.P., (2002). "Photoelectrocatalytic degradation of humic acid in aqueous solution using a Ti/ TiO₂ mesh photoelectrode. *Water Research*, 36, 2215-2224
- Matthews, R.W., (1987) "Solar-Electric Water Purification Using Photocatalytic Oxidation with Titanium Oxide as a Stationary Phase" *Solar Energy* 38, 405-413.
- Mehos MS, Turchi CS (1993) Field Testing Solar Photocatalytic Detoxification on TCE-Contaminated Groundwater. *Environ. Prog.* 12:194-199

- Mikula, M., Blecha, J., Ceppan, M., (1992) "Photoelectrochemical properties of anodic TiO₂ layers prepared by various current densities" *Electrochem. Soc.* 139 3470-3474
- Palmer, P.L., Eggins, B.R. ve Coleman, H.M., (2002) "The Effect of Operational Parameters on the Photocatalytic Degradation of Humic Acid" *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, 148:137-143.
- Pelegri, R., Reyes J., Duran, N., Zamora, P.P. ve De Andrade, A.R. (2000) "Photoelectrocatalytic Degradation of Lignin" *Journal of Applied Electrochemistry*, 30:953-8
- Pinhedo L., Pelegri R., Bertazzoli R., Motheo A.J. (2005) "Photoelectrochemical Degradation Of Humic Acid On A (TiO₂)_{0.7}(RuO₂)_{0.3} Dimensionally Stable Anode" *Applied Catalysis B: Environmental* 57:75-81
- Sayıllan F., Tatar P., Asiltürk M., Kiraz N., Arpaç E., Sayıllan H. (2006) Nano- Anataz TiO₂ Sentezi ve Fotokatalitik Aktivitesinin İncelenmesi, *Kimya Mühendisleri Odası*
- Savage N., ve Diallo M.S., (2005) "Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges" *Journal of Nanoparticle Research* 7:331-342
- Selçuk H., Sene J.J. and Anderson M.A. (2003). Photoelectrocatalytic Humic Acid Degradation Kinetics and Effect of pH, Applied Potential and Inorganic Anions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 78:979-984
- Selçuk H., Sene J.J., Sarıkaya H.Z., Bekbolet M. ve Anderson M.A (2004) "An Innovative Photocatalytic Technology in The Treatment of River Water Containing Humic Substances" *Water Science and Technology*, 49/4:153 – 158.
- Selçuk H., Sene J.J., Zaroni M.V.B., Sarıkaya, H.Z. and Anderson M.A., (2004) "Behavior of bromide in the Photoelectrocatalytic (PEC) process and Bromine Generation Using Nanoporous TiO₂ thin-film Electrodes" *Chemosphere*, 54/7 :9-974.
- Selçuk H., Sene J.J. Bekbolet M., Sarıkaya H.Z. and Anderson M.A. (2004). "Photocatalytic and Photoelectrocatalytic Performance of 1% Pt Doped TiO₂ for the Detoxification of Water" *Journal of Applied Electrochemistry*, 34:653–658
- Shaphard, G.S., Stockenstrom, S., deVilliers, D., Engelbrecht, W.J. and Wessels, G.F., (2002) "Degradation of microcystin toxins in a falling film photocatalytic reactor with immobilized titanium dioxide catalyst" *Water Research*, 36 (1):140-146.
- Vinodgopal, K., Stafford, U., Gray, K. A. ve Kamat, P.V., (1994) "Electrochemically assisted photocatalysis, 2. The role of oxygen and reaction intermediates in the degradation of 4- chlorophenol on immobilized TiO₂ films" *Journal of Physical Chemistry*, 98:6797-6803
- Zaroni, M.V.B, Sene, J. J. ve Anderson, M. A. (2003) "Photoelectrocatalytic degradation of remazol brilliant orange 3R on titanium dioxide thin-film electrodes" *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157:55-63
- Zeltner, W.A., Hill, C.H., Anderson, M.A., (1993). *Chemtech* 21-28.