



Geliş(Received) :13.07.2021
Kabul(Accepted) :27.09.2021

Derleme
Doi: 10.30708.mantar970777

Deniz Orjinli Fungus Kaynakları ve Lakkaz Üretimi

Ali KOÇYİĞİT^{*1}, Sultan Kübra TOKER²

*Sorumlu yazar: kocyigitali@gmail.com

Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Temel ve Endüstriyel Mikrobiyoloji Anabilim Dalı, Bornova-İzmir, Turkey

¹Orcid No/Orcid ID: 0000-0002-2960-6722 /kocyigitali@gmail.com

²Orcid No/Orcid ID: 0000-0002-7088-6690 /sultankubratoker@gmail.com

Öz: Lakkazlar (EC 1.10.3.2) ek bir kofaktöre ihtiyaç duymamaları, kararlı yapıda olmaları, fenolik ve fenolik olmayan bileşiklerde dahil olmak üzere geniş bir substrat aralığına sahip olmaları gibi önemli özelliklere sahiptir. Endüstriyel süreçlerde kullanılmak üzere lakkaz enziminin elde edildiği birçok tür bulunur. Ancak bu süreçler için hala yüksek redoks potansiyeli, tuz toleransı ve sıcak-soğuk adaptiflik gibi özelliklere sahip yeni lakkaz kaynakları araştırılmaktadır. Fungal lakkazların kalıcı ve zor bozulan bileşiklerin parçalanmasındaki etkinliği de birçok kez rapor edilmiştir. Karasal sistemlerden çok sayıda lakkaz üretici fungus araştırılmış, üretim süreci optimize edilmiş, endüstriyel ve çevresel proseslere uygulanmış olmasına karşın deniz orjinli funguslardan lakkaz araştırmaları ve uygulamaları sınırlıdır. Fakat deniz orjinli fungusların denizel çevrelerdeki stres faktörlerine (değişken pH, sıcaklık, basınç, güneş ışığının farklı derinliğe sahip bölgelere nüfuz etmesindeki değişkenlik, düşük besin elementi koşulları gibi) adaptasyonları onların karasal muadillerinden daha farklı, keşfedilmemiş ve aktif metabolit üreticileri yapmaktadır. Bu derlemede lakkazın üretimi, optimizasyon çalışmaları, deniz orjinli lakkaz kaynaklarının önemi ve gelişen uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lakkaz, Deniz orjinli fungus, Optimizasyon, Parçalanma

Marine-Derived Fungal Sources and Laccase Production

Abstract: Laccases (EC 1.10.3.2) have important properties such as not requiring an additional cofactor, significant stability, and a wide range of substrate including phenolic and non-phenolic compounds. There are many fungi from which the laccase enzyme is obtained for using in industrial processes. However, new laccase sources with properties such as high redox potential, salt tolerance and hot-cold adaptivity are still being investigated for these the processes. The efficacy of fungal laccases in degradation of persistent and hardly degradable compounds has also been reported many times. Although many laccase-producing fungi from terrestrial systems have been researched, the production process has been optimized and applied to industrial and environmental processes, laccase research and applications from marine origin fungi are limited. However, the adaptation of marine origin fungi to stress factors in marine environments (such as variable pH, temperature, pressure, variability in the penetration of sunlight to different depths, low nutrient conditions) makes them different, unexplored and active metabolite producers than their terrestrial equivalents. In this review, information was given about laccase production, optimization studies, importance of marine laccase sources and developing application areas.

Key words: Laccase, Marine-derived fungi, Optimization, Degradation

Giriş

Lakkaz enzimi (benzendiol, oksijen oksidoredüktaz, EC 1.10.3.2) polifenol oksidaz ailesine ait olup birçok organik bileşiğin oksidasyonunu katalizler (Mainardi et al., 2018). Bunun yanında hem fenolik ve fenolik olmayan lignoselülozik bileşenleri hem de çevreyi kirleten kimyasal maddeleri okside edebilirler (Wikee et

al., 2019). Ek olarak, bitkisel lignifikasyon ve delignifikasyon, yara iyileşmesi, pigment sentezi, anti-stres regülasyonu ve fungal morfogenez gibi birçok fizyolojik fonksiyonları da bulunur.

Lakkaz enzimi bitkilerde, funguslarda, prokaryotlarda ve böceklerde bulunur (Mainardi et al., 2018). Bu organizmalar içerisinde en etkili lakkaz üretimi



yapan tür Basidiomycota filumuna ait funguslarda görülmüştür. Bu funguslar, lignini parçaladıktan sonra kalan odun üzerinde beyaz toz bir kalıntı bırakmasından dolayı genelde beyaz-çürükçül fungusları olarak adlandırılırlar. Son yıllarda, bu enzimler özellikle tekstil boyalarının biyoparçalanma ve biyoyileştirmelerinde kullanılmaktadır. Boyalar sentetik aromatik bileşikler olup, tekstil, kağıt, kağıt hamuru gibi endüstrilerde kullanılır (Barathikannan et al., 2017). Özellikle tekstil endüstrisinin atık suları sulu ortamlar için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Tekstilde kullanılan bazı boyalar bu sulu ortamda yaşayan mikroorganizmalar, bitkiler ve balıklar

için zararlı olabileceği gibi insan hayatını tehdit edebilecek derecede organları etkileyebilir ve sağlık problemlerine yol açabilir (Bonugli-Santos et al., 2016).

Bu zararlı etkilerini gidermek üzere lakkaz enzimlerinin özellikle deniz orijinli funguslardan elde edilmesi önemli olabilir, çünkü deniz kökenli mikroorganizmalar doğal olarak okyanuslardaki ekstrem sıcaklığa, asiditeye, basınca ve/veya tuz konsantrasyonuna adapte olmuştur. Bu çalışmada da lakkaz enziminin elde edildiği denizel ortamlarda yaşayan funguslar ve kullanım alanları irdelenmiştir.

Tablo 1. 2015 yılından beri lakkaz üretimi için kullanılan bazı fungus türleri, yöntem ve verim artışı

Fungus adı	Kullanılan yöntem	Verimlilik	Referans
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P. Kumm. (İstiridyemantarı) (Sesli ve ark., 2020)	Katı Faz Fermantasyonu- Plackett–Burman tasarımı ve Merkezi Kompozit dizaynı-Şeker Kamışı Küspesi	5.7 kat artış	Karp et al., 2015
<i>Tricholoma giganteum</i> Massee AGHP	Katı Faz Fermantasyonu- Proses parametrelerinin optimizasyonu ve saflaştırma	10.8 kat artış	Patel and Gupte, 2016
<i>Trichoderma harzianum</i> Rifai HZN10 (Üç yeşilküf) (Sesli ve ark., 2020)	Katı Faz Fermantasyonu- Plackett–Burman tasarımı ve Yüzey-Yanıt metodoloji	8.09 kat artış	Bagewadi et al., 2017
<i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd (Hindikuyruğu) (Sesli ve ark., 2020)	Katı Faz Fermantasyonu- Buharla ön işlemden geçirilen mısır sapı	2.1 kat artış	Adekunle et al., 2017
<i>Aspergillus flavus</i> Link PUF5 (Cıbil asper) (Sesli ve ark., 2020)	Batık Kültür Fermantasyonu- "her seferinde bir değişken" dizaynı ve Merkezi Kompozit dizaynı	4.6 kat artış	Ghosh and Ghosh, 2017
<i>Marasmiellus palmivorus</i> Sharples LA1	Katı Faz Fermantasyonu- Taguchi tasarımı (DOE) metodolojisi	17.6 kat artış	Chenthamarakshan et al., 2017
<i>Ganoderma lucidum</i> (Curtis) P. Karst (Reyşi) (Sesli ve ark., 2020)	Batık kültür ve Katı Faz fermantasyonu- Plackett–Burman tasarımı	16.0 kat artış	Rodrigues et al., 2019
<i>Myrothecium verrucaria</i> (Alb. & Schwein.) Ditmar ITCC-8447 (Beyazvirgül) (Sesli ve ark., 2020)	Batık Kültür Fermantasyonu- Yüzey-Yanıt metodolojisi	1.45 kat artış	Agrawal et al., 2019
<i>Trametes versicolor</i>	Katı Faz Fermantasyonu- Merkezi Kompozit dizaynı - Çay kalıntıları	4.0 kat artış	Xu et al., 2020

1. Lakkaz Enzimi ve Aktivitesi

Lakkaz enzimi 1883 yılında dünyada ilk tanımlanan enzimlerden bir tanesidir. Geniş bir substrat spektrumu

vardır ve son elektron alıcısı olarak moleküler oksijeni kullanır. Lakkaz ile katalizlenen bir oksidasyon tepkimesinde ilk elektron alıcısı enzimin yüzeyine yakın



yerde bulunan bakır T1 molekülüdür. Fenolik bileşikler fenoksil radikallere okside eder. Lakkazlar hem katabolik (lignin ve humus parçalanması) hem de anabolik (polimerik pigment sentezi, kütikül sklerotizasyonu, lignifikasyon, toprak organik materyalinin humidifikasyonu) reaksiyonları katalizler. Redoks potansiyellerine göre düşük ve yüksek redoks potansiyelli enzimler olarak iki gruba ayrılır. Düşük redoks potansiyeline sahip lakkaz enzimleri bakterilerde, bitkilerde ve böceklerde bulunurken, yüksek redoks potansiyeline sahip lakkaz enzimleri funguslarda bulunur (Janusz et al., 2020).

Lakkaz enziminin hem organik hem de inorganik substratları bulunur. Bunlar fenoller, ketonlar, fosfatlar, askorbatlar, aminler ve lignindir. Özellikle fungal lakkaz enziminin lignin parçalanmasında rol oynadığı düşünülmektedir ve bu sebeple de Basidiomycota (beyaz-çürükçül funguslar) grubuna ait fungal lakkaz enzimleri oldukça önem taşır. Fungal lakkaz enzimleri ekstraselüler enzimlerdir ve yaklaşık 520-550 amino asitlik monomerik glikoproteinlerdir (glikozillenmiş formları 60-70 kDa'dır). Üç farklı kupredoksin benzeri domain içerirler (Mehra et al., 2018).

Çok geniş çapta substrat kullanabilme yetenekleri ve koenzim ihtiyaç duymadan yüksek etkinlik gösterebilmeleri sayesinde delignifikasyonda, kağıt hamuru yapımında ve biyoyakıt yapımı için biyokütlenin ön işlenmesi esnasında, atık su uygulamalarında, ksenobiyotiklerin parçalanmasında ve boyalar için renk giderimi ajanı olarak da başarılı bir şekilde kullanılır. Özellikle renk gideriminde lakkazlar ucuz, güvenilir ve etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Góralczyk-Bińkowska et al., 2020).

1.1 Funguslardan Lakkaz Üretimi

Lakkaz üretimi en çok Basidiomycete grubunda görülür. Fungal lakkazların üretiminde en iyi üretim yapan fungus türünün seçilmesi ve kültür koşullarının optimizasyonu ile yüksek verim elde edilebilir (Rodrigues et al., 2019). Lakkazların üretim maliyeti ve etkinliği büyük ölçekli uygulama alanları için önemlidir. Lakkazların üretim oranlarını arttırmak için ortam bileşenlerinin optimizasyonu sağlanabilir veya çeşitli

lignin içeren materyaller substrat olarak kullanılabilir (Góralczyk-Bińkowska et al., 2020). Endüstriyel amaçla kullanmak üzere lakkaz enziminin elde edildiği birçok tür bulunur. Son yıllarda özellikle istatistiksel dizaynların lakkaz üretim optimizasyonu için kullanıldığı görülmektedir. Bu istatistiksel yöntemler üretim sürecindeki varyasyonları da hesaplarken; klasik tek faktörün çalışıldığı optimizasyon yöntemi zaman alıcıdır ve yetersiz bir seçim olduğu bildirilmiştir (Chenthamarakshan et al., 2017). 2017 yılında Taguchi tasarımı (DOE) metodolojisi ile *Marasmiellus palmivorus* LA1 suşunda 17.6 kata varan lakkaz üretim verimi sağlanmıştır. Ek olarak Merkezi Kompozit dizaynı, Plackett–Burman tasarımı, Yüze-Yanıt metodolojisi kullanılan diğer yöntemler arasında sayılabilir (Tablo 1). Wang ve ark. (2019) tarımsal atıklardan lakkaz üretiminde batık kültür ve katı faz fermentasyon yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Ürün verimliliği kullanılan substrata göre farklılık göstermiştir. Junior ve ark. (2020) *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Singer (Yaman kaplanmantarı) (Sesli ve ark., 2020) türünden 3. günde 539.3 U/L verimlilikte lakkaz üretimini sağlamışlardır. Elde ettikleri lakkazı saflaştırmak için de sıvı iki fazlı sistem kullanmışlardır ve potansiyel olarak bu yöntemin kullanılabilirliğini öne sürmüşlerdir. Başka bir çalışmada, *Marasmiellus palmivorus* LA1 suşundan katı faz fermentasyonu ile lakkaz üretiminde Taguchi yöntemiyle optimizasyon yapmışlar ve başarılı olmuşlardır (Chenthamarakshan et al., 2017). Rodrigues ve ark. (2019) ise *Ganoderma lucidum* 'dan yarı batık ve katı faz fermentasyon yöntemleriyle önemli derecede lakkaz üretebildiklerini bildirmişlerdir.

Son yıllarda karasal bölgelerde funguslardan lakkaz elde edilmesi ve bunların endüstrideki kullanımlarına ilişkin çok fazla çalışma bulunurken, denizel ortamlarda yaşayan funguslardan lakkaz elde edilmesi üzerine çok ayrıntılı çalışma bulunmamaktadır. Halbuki, bu funguslardan elde edilecek lakkaz enzimi ekstrem pH, basınç, sıcaklık, vb. gibi koşullara dayanıklı olacaktır. Dolayısıyla kalıcı bileşiklerin biyoyileştirmeleri için uygulama potansiyelleri oldukça yüksektir

2. Deniz Orijinli Funguslar ve Lakkaz

2.1 Denizel çevrelerde funguslar

Denizel ortamlar mikroorganizma (tahminen $3,67 \times 10^{30}$) açısından çok zengin çevrelerdir (Theerachat et al., 2018). Bu ortamdaki mikrobiyal toplulukların (bakteriler, funguslar, algler, planktonlar ve virüsler) önemli birer ekolojik görevi olduğu düşünülmektedir (Bonugli-Santos et al., 2015).

Deniz orijinli funguslar süngerler ve sölentelerle ilişkilidirler ve organik bileşiklerin parçalanmasından sorumlu oldukları düşünülmektedir (Wikee et al., 2019). Deniz kıyısız çevrelerinde lignoselülozik substratların parçalanmasında da etkin rolleri bulunmaktadır. Denizel funguslar deniz suyu varlığında büyümelerine göre obligat veya fakültatif olarak iki grupta toplanabilir. Obligat

olan fungusların büyümesi ve sporulasyonu denizel ortamda veya nehir ağızlarında gerçekleşirken, fakültatif olanlar karasal ortamda veya tatlı suda yaşarken denizel ortamda da büyümeleri ve sporulasyonları gerçekleşebilir. "Deniz orijinli fungus" denmesinin bir sebebi de denizel örneklerden izole edilen fungusların obligat veya fakültatif olarak sınıflandırılmamasından kaynaklanır. Deniz orijinli funguslar genellikle mangrov, deniz çayırları, sediment örnekleri, süngerler veya alglerden izole edilmiştir (Bonugli-Santos et al., 2015; Mainardi et al., 2018; Ben Ali et al., 2020; Jia et al., 2020).

Deniz orijinli funguslar yüksek tuz konsantrasyonlarına, oligotrofik koşullara, ekstrem pH ve sıcaklıklara karşı dirençlidir. Bu organizmaların



kullanılmasının diğer bir avantajı da tekstil boyası atıkları gibi tuzlu ve alkali proseslerde kullanılabilirlerdir. Ayrıca Dünya'daki su rezervlerinin tükenmesi ve kuraklığın artması sebebiyle üretimde deniz suyunun kullanılacak olması da diğer bir avantaj olarak görülebilir (Mainardi et al., 2018). Günümüzde denizel ortamlardan izole edilen suşlardan aljinat liyaz, amilaz, selülaz, kitinaz, glukosidaz, inulinaz, keratinaz, ligninaz, lipaz, nükleaz, fitaz, proteaz, lakkaz ve ksilanaz gibi enzimler elde edilmiştir. Bu enzimlerin yüksek miktarda üretimleri çoğunlukla yarı batık fermentasyonla gerçekleştirilmiştir (Bonugli-Santos et al., 2015).

2.2 Deniz orjinli funguslardan lakkaz üretimi ve uygulama alanları

Denizel ortamlardaki funguslardan elde edilmiş olan lakkaz enzimlerinin bildirilen optimum çalışma pH aralığı lakkazın kendi özelliğine göre değişmektedir. pH 3 gibi asidik ortamda aktivite gösteren lakkaz enzimi de bulunurken, pH 8 gibi alkali ortamda aktivite gösteren lakkaz enzimi de mevcuttur. Aktivite gösterdiği optimum sıcaklığı 45 °C olan lakkaz enzimi bildirilmişken, 70 °C'de belirli bir süre aktivite gösterebilen lakkaz enzimleri de mevcuttur (Theerachat et al., 2018). Bu sebeple de izole edilen suştan üretilen lakkaz enziminin optimum koşulları da belirlenmelidir.

Fungal lakkaz üretimini laboratuvar ortamında sağlamak ve hatta arttırmak için en önemli basamaklardan birisi besiyeri optimizasyonudur. Bunun için de karbon kaynakları ve bakır iyonları en önemli uyanlardır (Passarini et al., 2015), ancak besiyerinin tuzluluk oranı ve azot kaynağı da oldukça önemlidir (Theerachat et al., 2018). Bazı çalışmalarda farklı oranlarda yapay veya doğal deniz suyu içeren ortamlarda lakkaz üretim çalışmaları yapılmıştır. Deniz suyu içeren ortamlardaki lakkazların üretimi ve fungal kolonilerin gelişiminin incelenmesi; deniz orjinli fungusların çevreye adaptasyonunu test etmek için önemli bir noktadır. Çeşitli çalışmalarda deniz suyu içeren ortamlarda deniz orjinli fungusların parçalayıcı enzimleri ürettiği gösterilmiştir (D'Souza et al., 2006; Raghukumar et al., 1999).

Deniz orjinli funguslardan lakkaz üretiminin varlığını katı besiyerinde test etmek için çeşitli indikatör bileşikler kullanılır. Bu indikatör bileşikler guaiacol, ABTS (2,2'-azino bis (3-ethylbenzothiazoline-6- sulphonic acid)), siringaldizin olabilir. Enzimlerin üretimi fungal koloninin etrafında veya altında renk değişimlerinin (yeşil, kırmızı, kahverengi) oluşması ile tespit edilir (Patel and Bhaskaran, 2016; Atalla et al., 2010; D'Souza et al., 2006). Lakkaz aktivitesi ise daha çok ABTS oksidasyonuna bağlı olarak ölçülmektedir. Yöntemler ve kullanılan besiyerleri genellikle karasal sistemlerden izole edilen funguslar için kullanılanlar ile benzer olmakla birlikte; besiyerine değişen oranlarda deniz suyunun eklenmesiyle modifiye ortamlarda kullanılabilir.

Denizel funguslardan lakkaz enziminin üretimine ilişkin çalışmalar mevcuttur. 2015 yılında Passarini ve ark. deniz orjinli *Nigrospora* Zimm. (Karaspor) ve *Arthopyrenia*

A. Massal. (Karabenli) (Sesli ve ark., 2020) cinslerinden lakkaz üretebildiklerini bildirmişlerdir. Abeer ve ark. (2015) deniz orjinli *Alternaria tenuissima* (Kunze) Wiltshire (Narinküf) (Sesli ve ark., 2020) NRC 9 suşunun lakkaz üretiminde oldukça aktif olduğunu ve bu organizmadan elde edilen lakkazın birçok biyoproseste kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Mainardi ve ark. (2018) *Peniophora* Cooke (Dalsüsü) (Sesli ve ark., 2020) CBMI 1063 suşundan lakkaz üretimini hem çalkalamalı tankta hem de airlift biyoreaktörlerde gerçekleştirmişlerdir. Çalkalamalı tankta daha yüksek seviyede ürettiklerini bildirmişlerdir. Bu suşun endüstriyel anlamda lakkaz üretimi için kullanılabilceğini öne sürmüşlerdir.

Deniz orjinli lakkazların özellikle çevre biyoteknolojisi alanında uygulanabilirliği yüksektir. Polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH'lar) parçalanması buna örnek verilebilir. PAH'lar iki veya daha fazla benzen halkası içeren aromatik hidrokarbonlar olup ekosistemi ciddi şekilde tehdit eden kiroleticilerdir. Bunun yanında toksisiteleri, karsinogenisiteleri, mutajenisiteleri ve biyoparçalanmaya karşı olan dirençlilikleri sebebiyle bu moleküllerin doğada parçalanması çok önemlidir. Bu maddelerin kaynakları fosil yakıtlar, katran, odun, çöpler, atıklar, kullanılmış motor yağları ve yağ filtreleri, çöplerin/atıkların yakılması ile petrol dökülmesi veya boşaltılmasıdır. PAH aynı zamanda denizel ortamda bulunabilir. Derin denizlerde bu maddenin biyoparçalanması yüksek basınçta ve düşük sıcaklıkta metabolik aktivitenin azalması veya bakterilerin büyümesini sınırlaması sebebiyle oldukça zordur (Theerachat et al., 2019). Dolayısıyla da bu ekstrem koşullara adapte olabilen veya tolerans gösterebilen denizel funguslardan elde edilecek enzimler bu amaçla kullanılabilir. Yakın zamanlı bir çalışma olan Atlantik okyanusu kıyılarından izole edilen *Mucor irregularis* Stchigel, Cano, Guarro & Ed. Álvarez bpo1 suşu ile PAH parçalanması yüksek miktarda lakkaz ve mangan peroksidaz üretimine bağlı olarak doğrulanmıştır (Bankole et al., 2021a). Son yıllarda denizel funguslardan lakkaz enziminin üretilmesi oldukça ilgi çekici hale gelmiştir ve bu fungusların çevredeki kalıcı bileşikleri parçalama potansiyeli ile ilgili raporlar artmaktadır. Çeşitli endüstrilerin yoğun renkli atıklarının dekolorizasyon çalışmalarında da deniz orjinli funguslar uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu renkli atıkların özellikle sucul çevrede meydana getirdikleri sorunlar (toksik ve mutajenik etki, güneş ışığının alt tabakalara ulaşmasının engellenmesi, birincil üretimin azalışı gibi) düşünüldüğünde deniz orjinli fungal lakkazların önemi ve çevresel proseslere entegrasyonunun gerekliliği anlaşılmaktadır. Tablo 2'de denizel çevrelerden izole edilen bazı funguslar ve lakkaz enzimlerinin uygulama alanları yer almaktadır. Dekolorizasyon çalışmalarıyla başlayan deniz orjinli fungal lakkaz araştırmaları günümüzde, PAH'ların ve hatta ilaçların parçalanmasına kadar uzanmaktadır.



Tablo 2. Lakkaz üretici deniz orjinli funguslar ve uygulamaları

Deniz orjinli fungus	Uygulama	Referans
<i>Flavodon flavus</i> Klotzsch	Poly-R, Poly B-411, Azure B, Brilliant green, Congo red, ve Remazol brilliant blue R- Dekolorizasyon	Raghukumar et al., 1999
<i>Cerrena unicolor</i> (Bull.) Murrill (Katmerlimantar) (Sesli ve ark., 2020)	Congo red, Trypan blue, Methylen blue, Aniline blue- Dekolorizasyon	D'Souza-Ticlo et al., 2009
<i>Cerrena unicolor</i> , <i>Coriopsis byrsina</i> (Mont.) Ryvarden, <i>Diaporthe</i> sp. (Nitschke) (Gürgeçibani) (Sesli ve ark., 2020), <i>Pestalotiopsis</i> sp. Steyaert	Boya içeren tekstil atıklarının giderimi ve detoksifikasyonu	Verma et al., 2010
<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc. (Patates solduran) (Sesli ve ark., 2020) (mangrov)	Antrasen ve benz[a]antrasen parçalanması	Wu et al., 2010
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. (Astımküfü) (Sesli ve ark., 2020)	Reactive black ve Crystal violet- Dekolorizasyon	Abd El Aty and Mostafa, 2013
<i>Trichoderma</i> sp. Pers. (Yeşilküf) (Sesli ve ark., 2020)	Malachite green- Biyoparçalanma	Saravanakumar et al., 2014
<i>Alternaria tenuissima</i>	Congo red ve Crystal violet - Dekolorizasyon	Abd El Aty et al., 2016
<i>Peniophora</i> sp.	Reactive Black 5- Dekolorizasyon	Bonugli-Santos et al., 2016
<i>Trichoderma asperellum</i> Samuels, Lieckf. & Nirenberg (Kaba Yeşilküf) (Sesli ve ark., 2020)	Remazol Brilliant Blue R, Reactive Black 5, Direct Red 75, Acid Orange 51 ve Turquoise Blue-Dekolorizasyon	Ben Ali et al., 2020
<i>Alternaria</i> sp. Nees D21 (Arıküfü) (Sesli ve ark., 2020)	Methyl orange, Acid green 3, Methylene blue, Remazol Brilliant Blue R, Crystal violet ve Congo red	Toker et al., 2021
<i>Mucor irregularis</i> bpo1	Floren (PAH) parçalanması	Bankole et al., 2021 (a)
<i>Aspergillus aculeatus</i> Lizuka (Sivri asper) (Sesli ve ark., 2020)	Olsalazin (anti-inflamatuar ilaç) parçalanması	Bankole et al., 2021 (b)

Sonuç

Deniz ortamları oligotrofik koşullar, değişken sıcaklık, pH, basınç, ağır metaller, güneş ışığının farklı derinliğe sahip bölgelere nüfuz etmesindeki değişkenlik gibi birçok stres faktörünü içermektedir. Burada yaşayan deniz orjinli fungusların hücre dışı enzimlerinin bu koşullar altında uzun süre aktivitesini koruması beklenir. Bu enzimlerden lakkaz, çevrede inatçı ve kalıcı bileşiklerin parçalanması prosesleri için oldukça uygundur. Bu durumun nedenleri arasında ek bir kofaktör gerektirmemesi, aktivite için basit gereksinimlerinin bulunması ve substrat aralıklarının oldukça geniş olması sayılabilir. Lakkazların bu özellikleri deniz gibi ekstrem ortamlardaki stabiliteyi ile birleşince umut vaadedici

sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin endüstriyel atıklar global bir çevre sorunudur. Denizden izole edilen fungal suşların lakkaz enzimlerinin yine alkalın ve yüksek tuz içeriğine sahip endüstri atıklarının gideriminde deşarj öncesi kullanımı ileri çalışmalar için önerilmektedir. Ancak her organizmanın lakkaz enziminin oksidatif gücü değişkendir. Deniz orjinli lakkaz enzimleri henüz tam olarak tanımlanmamıştır ve bu nedenle daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Deniz orjinli funguslar, çok sayıda henüz keşfedilmemiş enzim ve biyomolekül ile donatılmıştır. Denizel fungusların çeşitliliğini keşfetmek, enzimlerini ve sekonder metabolitlerini tanımlamak; gelecekteki uygulamalar için önem arz etmektedir.



Kaynaklar

- Abd El Aty, A.A., Hamed, E.R., El-Beih A.A. and El-Diwany, A.I. (2016). Induction and enhancement of the novel marine-derived *Alternaria tenuissima* KM651985 laccase enzyme using response surface methodology: Application to Azo and Triphenylmethane dyes decolorization. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 6 (4), 006-014.
- Abd El Aty, A.A. and Mostafa, F.A. (2013). Effect of various media and supplements on laccase activity and its application in dyes decolorization. *Malaysian Journal of Microbiology*, 9(2), 166-175.
- Abeer, A.A.E.A., Aliaa, R.E.S., Sherien, M.M.A., El-Diwany, A.I. and Eman, R.H. (2015). Screening of Fungal Isolates for Laccase Enzyme Production from Marine Sources. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 221.
- Adekunle, A.E., Zhang, C., Guo, C., and Liu, C.Z. (2017). Laccase Production from *Trametes versicolor* in Solid-State Fermentation of Steam-Exploded Pretreated Cornstalk. *Waste Biomass Valor*, 8, 153–159.
- Agrawal, K., Bhardwaj, N., Kumar, B., Chaturvedi, V., and Verma, P. (2019). Process optimization, purification and characterization of alkaline stable white laccase from *Myrothecium verrucaria* ITCC-8447 and its application in delignification of agroresidues. *International Journal of Biological Macromolecules*, 15;125, 1042-1055.
- Atalla, M.M., Zeinab, H.K., Eman, R.H., Armani, A.Y., and Abeer, A.A.E.A. (2010). Screening of some marine-derived fungal isolates for lignin degrading enzymes (LDEs) production. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1, 591–599.
- Bagewadi, Z.K., Mulla, S.I., and Ninnekar, H.Z. (2017). Optimization of laccase production and its application in delignification of biomass. *International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture*, 6, 351-365.
- Bankole, P.O., Semple, K.T., Jeon, B.H., and Govindwar, S.P. (2021a). Biodegradation of fluorene by the newly isolated marine-derived fungus, *Mucor irregularis* strain bpo1 using response surface methodology. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111619.
- Bankole, P.O., Semple, K.T., Jeon, B.H., and Govindwar, S.P. (2021b). Impact of redox-mediators in the degradation of olsalazine by marine-derived fungus, *Aspergillus aculeatus* strain bpo2: Response surface methodology, laccase stability and kinetics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111742.
- Barathikannan, K., Ramasamy, K.P., Manohar, C.S., and Meena, R.M. (2017). Diversity and decolorization potential of fungi isolated from the coral reef regions off Kavaratti. India. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 46(03), 497-503.
- Ben Ali, W., Chaduli, D., Navarro, D., Lechat, C., Turbé-Doan, A., Bertrand, E., Faulds, C.B., Sciara, G., Lesage-Meessen, L., Record, E. and Mechichi, T. (2020). Screening of five marine-derived fungal strains for their potential to produce oxidases with laccase activities suitable for biotechnological applications. *BMC Biotechnology*, 20, 27.
- Bonugli-Santos, R.C., Vasconcelos, M.R.S., Passarini, M.R.Z., Vieira, G.A.L., Lopes, V.C.P., Mainardi P.H., dos Santos J.A., Duarte, L.A., Otero, I.V.R., Yoshida, A.M.S., Feitosa, V.A., Pessoa, Jr. A., and Sette, L.D. (2015). Marine-derived fungi: diversity of enzymes and biotechnological applications, *Frontiers in Microbiology*, 6, 269.
- Bonugli-Santos, R.C., Vieira, G.A.L., Collins, C., Fernandes, T.C.C., Marin-Morales, M.A., Murray, P., and Sette, L.D. (2016). Enhanced textile dye decolorization by marine-derived basidiomycete *Peniophora* sp. CBMAI 1063 using integrated statistical design. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 8659-8668.
- Chenthmarakshan, A., Parambayil, N., Miziriya, N., Soumya, P.S., Kiran Lakshmi, M.S., Ramgopal, A., Dileep, A., and Nambisan, P. (2017). Optimization of laccase production from *Marasmiellus palmivorus* LA1 by Taguchi method of Design of experiments. *BMC Biotechnology*, 17(1), 12.
- D'Souza, D. T., Tiwari, R., Sah, A. K., and Raghukumar, C. (2006). Enhanced production of laccase by a marine fungus during treatment of colored effluents and synthetic dyes. *Enzyme and Microbial Technology*, 38, 504– 511.
- D'Souza-Ticlo, D., Sharma, D., and Raghukumar, C. (2009). A Thermostable Metal-Tolerant Laccase with Bioremediation Potential from a Marine-Derived Fungus. *Marine Biotechnology*, 11, 725-737.
- Ghosh, P. and Ghosh, U. (2017). Statistical optimization of laccase production by *Aspergillus flavus* PUF5 through submerged fermentation using agro-waste as cheap substrate. *Acta Biologica Szegediensis*, 61(1), 25-33.
- Goralczyk-Bińkowska, A., Jasińska, A., Długoński, A., Płociński, P., and Długoński, J. (2020). Laccase activity of the ascomycete fungus *Nectriella pironii* and innovative strategies for its production on leaf litter of an urban park. *PLOS ONE*, 15(5): e0233553.
- Janusz, G., Pawlik, A., S'widerska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J., Jarosz-Wilkolazka, A., and Paszczyn'ski, A. (2020). Laccase Properties, Physiological Functions, and Evolution. *International Journal of Molecular Science*, 21, 966.
- Jia, S.L., Chi, Z., Liu, G.L., Hu, Z., and Chi, Z.M. (2020). Fungi in mangrove ecosystems and their potential applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40:6, 852-864.
- Junior, J.A., Vieira, Y.A., Cruz, I.A., da Silva Vilar, D., Aguiar, M.M., Torres, N.H., Bharagava, R.N., Lima, Á.S., de Souza, R.L., and Romanholo Ferreira, L.F. (2020). Sequential degradation of raw vinasse by a laccase enzyme producing fungus *Pleurotus sajor-caju* and its ATPS purification. *Biotechnol Rep (Amst)*, 13, 25:e00411.



- Karp, S.G., Faraco, V., Amore, A., Junior Letti, L.A., Soccol, V.T., and Soccol, C.R. (2015). Statistical Optimization of Laccase Production and Delignification of Sugarcane Bagasse by *Pleurotus ostreatus* in Solid-State Fermentation. *BioMed Research International*, Volume 2015, Article ID 181204, 8.
- Mainardi, P.H., Feitosa, V.A., Brenelli de Paiva, L.B., Bonugli-Santos, R.C., Squina, F.M., Jr, A.P., and Sette, L.D. (2018). Laccase production in bioreactor scale under saline condition by the marine-derived basidiomycete *Peniophora* sp. CBMAI 1063. *Fungal Biology*, 122, 302-309.
- Mehra, R., Muschiol, J., Meyer, A.S., and Kepp, K.P. (2018). A structural-chemical explanation of fungal laccase activity. *Scientific Reports*, 8, 17285.
- Passarini, M. R., Ottoni, C. A., Santos, C., Lima, N., and Sette, L. D. (2015). Induction, expression and characterisation of laccase genes from the marine-derived fungal strains *Nigrospora* sp. CBMAI 1328 and *Arthopyrenia* sp. CBMAI 1330. *AMB Express*, 5, 19.
- Patel, H. and Gupte, A. (2016). Optimization of different culture conditions for enhanced laccase production and its purification from *Tricholoma giganteum* AGHP. *Bioresources and Bioprocessing*, 3, 11.
- Patel, R.J., and Bhaskaran, L., (2016). Screening of novel Ascomycetes for the production of laccase enzyme using different lignin model compounds. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 7(4), 452-458.
- Raghukumar, C., D'Souza, T. M., Thorn, R. G., and Reddy, C. A. (1999). Lignin- Modifying Enzymes of *Flavodon flavus*, a basidiomycete Isolated from a Coastal Marine Environment, *Applied and Environmental Microbiology*, 65(5), 2103-2111.
- Rodrigues, E.M., Karp, S.G., Malucelli, L.C., Helm, C.V., and Alvarez, T.M. (2019). Evaluation of laccase production by *Ganoderma lucidum* in submerged and solid-state fermentation using different inducers. *Journal of Basic Microbiology*, 59, 784-791.
- Saravanakumar, K., and Kathiresan, K. (2014). Bioremoval of the synthetic dye malachite green by marine *Trichoderma* sp. *SpringerPlus*, 3, 631.
- Sesli, E., Asan, A., Selçuk, F. (eds), Abacı Günyar, Ö., Akata, I., Akgül, H., Aktaş, S., Alkan, S., Allı, H., Aydoğdu, H., Berikten, D., Demirel, K., Demirel, R., Doğan, H.H., Erdoğan, M., Ergül, C.C., Eroğlu, G., Giray, G., Halikî Uztan, A., Kabaktepe, Ş., Kadaifçiler, D., Kalyoncu, F., Karaltı, İ., Kaşık, G., Kaya, A., Keleş, A., Kirbağ, S., Kıvanç, M., Ocak, İ., Ökten, S., Özkale, E., Öztürk, C., Sevindik, M., Şen, B., Şen, İ., Türkeul, İ., Ulukapı, M., Uzun, Ya., Uzun, Yu., ve Yoltaş, A. (2020). *Türkiye Mantarları Listesi*. Ali Nihat Gökyiğit Vakfı Yayını. İstanbul.
- Toker, S.K., Evlat, H., and Koçyiğit, A. (2021). Screening of newly isolated marine-derived fungi for their laccase production and decolorization of different dye types. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101837.
- Theerachat, M., Guieysse, D., Morel, S., Remaud-Siméon, M., and Chulalaksananukul, W. (2019). Laccases from Marine Organisms and Their Applications in the Biodegradation of Toxic and Environmental Pollutants: a Review. *Appl Biochem Biotechnol*, 187, 583-611.
- Verma, A.K., Raghukumar, C., Verma, P., Shouche, Y.S., and Naik, C.G. (2010). Four marine-derived fungi for bioremediation of raw textile mill effluents. *Biodegradation*, 21(2), 217-33.
- Wang, F., Xu, L., Zhao, L., Ding, Z., Ma, H., and Terry, N. (2019). Fungal laccase production from lignocellulosic agricultural wastes by solid-state fermentation: A review. *Microorganisms*, 9, 7(12), 665.
- Wikee, S., Hatton, J., Turbé-Doan, A., Mathieu, Y., Daou, M., Lomascolo, A., Kumar, A., Lumyong, S., Sciara, G., Faulds C.B., and Record, E. (2019). Characterization and Dye Decolorization Potential of Two Laccases from the Marine-Derived Fungus *Pestalotiopsis* sp. *International Journal of Molecular Science*, 20, 1864.
- Wu, Y.R., Luo, Z.H., and Vrijmoed, L.L.P. (2010). Biodegradation of anthracene and benz[a]anthracene by two *Fusarium solani* strains isolated from mangrove sediments. *Bioresource Technology*, 101(24), 9666-72.
- Xu, L., Sun, K., Wang, F., Zhao, L., Hu, J., Ma, H., and Ding, Z. (2020). Laccase production by *Trametes versicolor* in solid-state fermentation using tea residues as substrate and its application in dye decolorization. *Journal Environment Management*. 15, 270:110904.