

## کلوبنینگ و بیان خارج سلولی آنزیم لاکاز از باکتری باسیلوس بومی چشمهدای آب *Pichia pastoris* گرم ایران در مخمر

Cloning and extracellular expression of laccase enzyme from bacillus of Iranian hot spring into yeast cell *Pichia pastoris*

محمد پرند<sup>۱</sup>، سید امید رعنایی سیادت<sup>۲</sup>، احمد یامچی\*

۱- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی

Parand M<sup>1</sup>, Ranaei Siadat SO<sup>2</sup>, Yamchi A<sup>\*3</sup>

1. PhD student and Assistant professor, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

2. Assistant professor, Faculty of Energy and New Technologies, Shahid Beheshti University, Iran

\* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [yamchi@gau.ac.ir](mailto:yamchi@gau.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۵ - تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۲۳)

### چکیده

لاکازها (EC 1.10.3.2) توانایی اکسیداسیون دائمی وسیعی از سوبستراهای فنولی و غیر فنولی را دارند. میزان مخمری با توجه به مزیت‌هایی که در قدرت راه انداز، کارایی ترشح، رشد سریع و آسان و عدم سمیت غذایی نسبت به سایر میزان‌های سلولی دارند، به طور قابل توجهی در تولید مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق ژن کد کننده آنزیم لاکاز که از باکتری باسیلوس سویه HR30 جداسازی شده بود با ترجیح کدونی برای مخمر *Pichia pastoris* سنتز شده و سپس در پلاسمید بیانی مخصوص مخمر پیکیا پاستوریس کلون شده و از طریق روش الکتروپوریشن به داخل مخمر انتقال یافت. برای تأیید کلوبنینگ از روش کلونی PCR و هضم آنزیمی استفاده شد و قطعه ۱۵۴۲ جفت بازی مشاهده شد. سپس ژن مورد نظر تحت شرایط دمایی و غلظت‌های متفاوت از سولفات مس بیان شد. نتایج نشان داد که میزان تولید پروتئین در غلظت‌های یک، یک و نیم و دو میلی‌مولا ر از سولفات مس (به عنوان کوفاکتور برای آنزیم) و درجه حرارت‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد محیط کشت متغیر بود. کاهش دمای محیط کشت تا مرز ۲۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت دو میلی‌مولا از سولفات مس توانست باعث بهبود فرایند تاخوردگی مجدد و فعالیت آنزیم لاکاز شود.

### واژه‌های کلیدی

بیان خارج سلولی  
پیکیا پاستوریس  
سولفات مس  
لاکاز  
مخمر

## مقدمه

است و طیف جذبی آن در حدود  $610\text{ nm}$  است. مس نوع T1 مسئول رنگ آبی آنزیم (Yaropolov et al. 1994) و طیف جذبی خاصی می‌باشد و با استفاده از روش طیف سنجی قابل شناسایی نمی‌باشد اما می‌تواند با ایجاد یک خصوصیت رزونانس القایی پارامغناطیسی (EPR)<sup>2</sup> مورد شناسایی قرار گیرد (Leontievsky et al. 2000). مس نوع T3 به صورت دو هسته‌ای بوده و دارای خاصیت پارامغناطیسی است و دارای طیف جذبی در محدوده  $330\text{ nm}$  نانومتر می‌باشد و همچنین یک Shin et al. (2000) خصوصیت طیف فلورسانسی را هم از خود نشان داد. مس های نوع T2 و T3 در یک خوش سه هسته‌ای قرار می‌گیرند و در این مکان احیای اکسیژن مولکولی و آزادسازی آب اتفاق می‌افتد (Gianfreda et al. 1990). مس نوع T1 که در مرکز قرار می‌گیرد در اکسیداسیون سوبستراهای کاهنده و انتقال الکترون‌ها به مس نوع T2 و T3 نقش دارد. مس نوع T1 دارای یک رابطه سه کانه با اسید آمینه‌های هیستیدین و سیستین است در حالی که در انواع باکتریایی آنزیم لاکاز چهار موقعیت مختلف همراه با یک متیونین فراهم می‌شود و در انواع قارچی این موقعیت چهارم با یک لوسین و یا یک فنیل آلانین فراهم می‌شود. به هر حال پتانسیل احیای مکان T1 در لاکازهای مختلف در محدوده  $430-780\text{ nm}$  قرار می‌گیرد (Xu 1996). این موضوع ثابت شده که کارایی کاتالیتیکی آنزیم لاکاز برای بعضی از سوبستراهای کاهنده یک رابطه خطی با پتانسیل احیای بالای در دارد. بنابراین آنزیم لاکازی که دارای پتانسیل احیای بالای در مکان T1 باشد، برای کاربردهای زیست فناوری می‌تواند بسیار مفید واقع شود. چرخه کاتالیتیک آنزیم لاکاز (به همراه چهار اتم اکسیژن مولکولی به دو مولکول آب را نشان می‌داد. به منظور احیای اکسیژن مولکولی به آب، آنزیم لاکاز مانند یک باطری عمل می‌کند و الکترون‌ها را از واکنش‌های اکسیداسیون منحصر به فردی ذخیره می‌کند. اکسیداسیون سوبسترا به وسیله لاکاز یک واکنش تک الکترونی محسوب می‌شود که باعث آزادسازی رادیکال‌های آزاد می‌شود. بنابراین اکسیداسیون چهار مولکول سوبستراتی کاهنده برای احیای کامل اکسیژن مولکولی به دو

لاکازها (EC: 1.10.3.2) اکسیدازهای چند مسی-n-گلیکوزیله شده می‌باشند که متعلق به گروهی از پروتئین‌های حاوی مس هستند (Xu 1996). لاکازها به طور گسترده در قارچ‌ها و گیاهان عالی یافت شده اما به نسبت کمتر در حشرات و باکتری‌ها نیز دیده می‌شوند. لاکاز برای اولین بار توسط فردی به نام Yoshida در سال ۱۸۸۳ معرفی شد (Thurston 1994). در سال‌های اخیر حضور آنزیم لاکاز در آسکومیست‌ها، دئترومیست‌ها و بازیدیومیست‌ها نشان داده شده است. علاوه بر این لاکازها به طور ویژه‌ای در قارچ‌های white-rot fungi که در متابولیسم لیگنین درگیر هستند، یافت می‌شوند (Thurston 1994). مولکول لاکاز قارچی به طور معمول شامل چهار اتم مس است، در حالی که بعضی از انواع آنزیم لاکاز نیز یافت می‌شود که حاوی سه اتم مس در ساختار خود می‌باشد. لاکازها وزن مولکولی در حدود  $50-100\text{ kDa}$  دارند و وقتی ABTS<sup>1</sup> به عنوان سوبسترا به کار برده می‌شود pH بهینه آنزیم در دامنه  $3-5$  قرار می‌گیرد (Heinzkill et al. 1998). لاکازها می‌توانند به صورت پلیمریک باشند و شکل آنزیمی و فعال آن نیز می‌تواند به صورت یک مونومر، دایمر، تریمر و یا تترامر باشد. آنزیم مذکور اگر از منبع یوکاریوتی بدست آید سطح بالایی از گلیکوزیلاسیون را نشان می‌دهد که این می‌تواند باعث افزایش پایداری آنزیم از طریق ایجاد پیوندهای کووالانسی با کربوهیدرات شود و در حدود  $10-45\text{ }\mu\text{M}$  درصد کل وزن پروتئین را به خود اختصاص می‌دهد (Kunamneni et al. 2007). برای لاکازها شماری از کاربردهای صنعتی پیشنهاد می‌شود که شامل تهیه کاغذ، سمزدایی از آلاینده‌های محیطی، اکسیداسیون رنگ‌ها و پیش ماده آنها، ایجاد تغییرات آنزیمی در واسطه‌های شیمیایی می‌باشد. دو مورد از مهمترین کاربردهای آنزیم لاکاز که بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌است، عبارتست از (1) لیگنین زدایی و سفید کردن خمیر چوب (2) پاک سازی زیستی آلاینده‌های محیطی (Schlosser et al. 1997).

چهار یون مس در ساختار آنزیم لاکاز در سه نوع طبقه‌بندی می‌شوند: مس نوع یک (T1)، مس نوع دو (T2) و مس نوع سه (T3).

<sup>2</sup> Electron paramagnetic resonance

<sup>1</sup> 2,2'-Azinobis (3-Ethylbenzthiazoline-6-Sulfonate)

محصول بدست آمده از تخلیص در حضور آنزیم T4 DNA لیگاز (شرکت فرمتاز) به یکدیگر متصل شدند و محصول این اتصال به داخل سلول مستعد *E.coli* DH5α متنقل شد. در تمامی مراحل از پروتوكول شرکت اینوپتروژن به نام PichiaPink™ Expression System استفاده شد. محصول ترانسفورماتیون به روی پلیت‌های LB حاوی آنتی‌بیوتیک آمپی سیلین در غلظت 100 μg/ml 100 انقال داده شد تا نتیجه تاریخی قابل مشاهده باشد. از کلونی‌ها پلیت مستر تهیه شد و در نهایت این کلونی‌ها با روش کلونی PCR از جهت تایید حضور ژن مورد بررسی قرار گرفتند و سرانجام جهت استخراج پلاسمید از این کلونی‌ها کشت LB مایع گذاشته شد و استخراج پلاسمید نیز با کیت شرکت سیناژن و ویوانتیس انجام شد. واکنش زنجیره‌ای پلیمراز با استفاده از کیت شرکت سیناژن و پلاسمید استخراج شده مربوطه به عنوان الگو، آغازگر رفت با توالی<sup>3'-5'</sup> GAGCTCGAGTCAAAGGGTTATCGACA و در نهایت آغازگر برگشت نیز با توالی<sup>5'-3'</sup> GGTACCGCATGCCTACTATCTGGAACC تایید صحت کلونینگ با روش هضم آنزیمی و کلونی PCR انجام شد. جهت ترازیرش و انتقال ناقل pPink-LCC به درون مخمر، لازم است که این پلاسمید توسط آنزیم محدود کننده *BspI* به صورت خطی در آید. برای انجام هضم آنزیمی ۶۰ میکرولیتر از پلاسمید، ۵ میکرولیتر از آنزیم *BspI* ۱۰ میکرولیتر از بافر و ۲۵ میکرولیتر آب دوبار تقطیر در حجم کلی ۱۰۰ میکرولیتر با یکدیگر مخلوط شدند و نمونه در حمام آب گرم ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شد. نتایج هضم آنزیمی بر روی ژل آگارز یک درصد تایید و مخلوط هضم آنزیمی برای تعییط شدن در انکوپاتور ۴۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و حجم نهایی از ۱۰۰ میکرولیتر به ۳۰ میکرولیتر کاهش یافت. در مرحله بعد پلاسمید خطی شده برای جلوگیری از جرقه زدن در

مولکول آب ضروری می‌باشد. بنابراین جزئیات احیای اکسیژن مولکولی هنوز به طور کامل شفاف نشده و تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد.

مخمرها بدلیل مزیت‌هایی که در رشد سریع و آسان و کارآمدی ترشح دارند، به عنوان میزبانان بسیار کارآمد در زمینه بیان ژن خارجی مطرح می‌باشند و به عنوان یک ارگانیسم غذایی برای تولید پروتئین‌های دارویی و غذایی بسیار مورد قبول می‌باشند. در سالهای اخیر محققان علاقه زیادی به شناسایی و تعیین خصوصیات لاکاز از منبع باکتریایی نشان داده‌اند. در این تحقیق ژن کد کننده آنزیم لاکاز از باکتری باسیلوس سویه HR03 جداسازی شد (Dalfard et al. 2006) و تحت شرایط میکروبی و درجه حرارت‌های خاصی به منظور به دست آوردن مقادیر بالا از پروتئین قابل حل در مخمر پیکیا پاستوریس بیان شد.

## مواد و روش‌ها

DNA پلیمراز Taq، آنزیم‌های محدودگر و سایر آنزیم‌ها در این تحقیق از شرکت فرمتاز تهیه شد. سرین گالدادزین<sup>1</sup> به عنوان سویسترای آنزیمی از شرکت سیگما تهیه شد. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده نیز از شرکت مرک، ساخت کشور آلمان سفارش داده شد.

### تولید و همسانه‌سازی ژن لاکاز

ژن کد کننده آنزیم لاکاز با شماره ثبت FJ663050 در بانک اطلاعاتی ژن (NCBI) با ترجیح کلونی مخمر پیکیا پاستوریس استر شد و ژن استر شده در قالب پلاسمید PUC-LCC دریافت شد. این پلاسمید ابتدا جهت تکثیر به باکتری *E.coli* DH5α انتقال داده شد و سپس جهت تایید حضور ژن لاکاز واکنش و هضم آنزیمی دوگانه با آنزیم‌های *XbaI* و *KpnI* انجام شد. ژن کد کننده آنزیم لاکاز بعد از جداسازی از پلاسمید PUC به همراه پلاسمید Ppink-α که پلاسمید بیانی مخصوص پیکیا پاستوریس است، ابتدا توسط آنزیم‌های *XbaI* و *KpnI* (سایت‌های برشی برای این آنزیم‌ها در ابتدا و انتهای ژن طراحی شد و در پلاسمید بیانی وجود داشت) مورد هضم آنزیمی قرار گرفته و سپس توسط کیت تخلیص DNA (شرکت فرمتاز) تخلیص شد. هر دو

<sup>1</sup> Syringaldazine

ز- سانتریفیوژ در  $4500 \times g$  به مدت زمان ۵ دقیقه انجام شد و سپس ۱۷۰۰ میکرولیتر از محلول رویی دور ریخته شد و رسوب در ۳۰۰ میکرولیتر باقیمانده از محلول حل شد.

ح- محلول به پلیت انتخابی PAD انتقال و به مدت ۳-۸ روز در انکوباتور ۳۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت.

در کیت پودر آماده محیط PAD موجود میباشد که پودر در ۹۰۰ میلی لیتر آب حل شد و محیط حاصله به مدت ۲۰ دقیقه اتوکلاو شد و پس از اتمام اتوکلاو و سرد شدن محیط (زمانی که دما حدود ۴۵-۵۰ درجه سانتی گراد رسید)، ۱۰۰ میلی لیتر دکستروز یا گلوکز X ۱۰ و حدود ۵۰۰ میکرولیتر آمپی سیلین به محیط اضافه شد و در زیر هود استریل حدود ۱۵ میلی لیتر از محیط درون هر پلیت ریخته شد.

راه کارهای بیان پروتئین

در ادامه با توجه به دستورالعمل شرکت اینویتروژن به منظور بیان زن لاکاز، کلونی های تایید شده در محیط BMGY (محیط حاوی گلیسرول) در شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و دور ۳۰۰ rpm رشد داده شدند. بعد از گذشت دو تا سه روز و رشد سلول ها، آنها به محیط BMGY (محیط حاوی متانول ۵ درصد) منتقل شدند و ارلن ها دوباره با همان درجه حرارت و دور به شیکر انکوباتور برگردانده شدند و به مدت پنج روز هر ۲۴ ساعت به هر ارلن ۵/۰ درصد حجمی متانول اضافه شد (متانول القاء کننده پرومومتر AOX1 است). در نهایت بعد از گذشت پنج روز محیط BMGY به مدت ۱۰ دقیقه با  $4500 \times g$  رسوب داده شد و سوپرناتانت های به دست آمده بر روی ژل پلی آکریل آمید برده شدند.

سنجرش فعالیت آنزیمی

فعالیت آنزیمی لاکاز با استفاده از روش طیف سنجی و در درجه حرارت اتاق با سوبسترای سرین گالدازین مورد سنجرش قرار گرفت. در مخلوط سنجرش آنزیمی، اکسیداسیون سوبسترای سرین گالدازین (غلظت ۰/۰۵ میلی مولار و قابل حل در متانول مطلق) در بافر فسفات ۱۰۰ میلی مولار با  $pH = 7$  به وسیله میزان افزایش در جذب ۵۲۵ نانومتر نشان داده شد. مقادیر مورد استفاده در سنجرش فعالیت آنزیمی در جدول یک آورده شده است.

حین الکتروپوریشن با استفاده از کیت شرکت ویوانتیس خالص شد. جهت تهیه سلول های مستعد مخمر برای انجام ترازیزش، نیاز به تهیه کشت مخمر از سویه مورد نظر می باشد. در این راستا از سویه شماره ۴ مخمر پیش کشت تهیه شد به این ترتیب که ۱۰ میلی لیتر، محیط YPD مایع حاوی آمپی سیلین درون ارلن ۱۰۰ میلی لیتری ریخته شد و توسط لوپ تک کلونی از کشت خطی سویه مخمر (که از قبل کشت داده شده بود)، برداشته و در ارلن حاوی محیط YPD کشت شد. سپس ارلن ها درون انکوباتور شیکردار با دور ۲۷۵ rpm و دمای ۳۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند، بعد از حدود ۲۰-۲۴ ساعت با در نظر گرفتن OD حاصله، نمونه ها تا رسیدن به  $OD = 0/2$  رقیق شدند. سپس ارلن های جدید درون انکوباتور با شرایط قبلی قرار داده شدند تا OD آنها به  $1/3$  تا  $1/5$  برسد (تقریبا حدود ۹-۱۴ ساعت طول می کشد).

پس از رسیدن OD محیط کشت پیکیا به حد مورد نیاز، سلول های مستعد مخمر جهت ترازیختن تهیه شد و سپس الکتروپوریشن (برای الکتروپوریشن از دستگاه شرکت Bio-Rad استفاده شد) با استفاده از روش زیر انجام شد:

الف- پلاسمید خطی و خالص شده با سلول های مستعد مخلوط شده و ۵ دقیقه بر روی یخ قرار گرفت (۲۰ میکرولیتر از ناقل بر روی ۱۰۰ میکرولیتر سلول مستعد ریخته شد)

ب- مخلوط فوق در کووت های سرد ریخته شد و سپس کووت به طور کامل خشک شد.

ج- الکتروپوریشن با ولتاژ ۱۷۶۰ ولت و زمان ۴/۶ میلی ثانیه انجام شد.

د- یک میلی لیتر سوربیتول سرد به کووت اضافه شد و بعد از مخلوط کردن، محلول به داخل فالکون ۱۵ میلی لیتری منتقل شد.

ه- فالکون به مدت یک ساعت در انکوباتور ۳۰ درجه سانتی گراد گذاشته شد.

و- یک میلی لیتر از محیط YPD (باید فاقد آمپی سیلین باشد) به فالکون اضافه شد و به مدت یک ساعت در شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد گذاشته شد.

## کلینیک و بیان خارج سلوی آنزیم لاکاز از باکتری ...

حضور ژن آنزیم لاکاز PCR انجام شد. محصول PCR بر روی ژل آگارز یک درصد برد شد که حضور قطعه ۱۵۴۲ جفت بازی تایید کننده حضور ژن آنزیم لاکاز در پلاسمیدهای استخراج شده بود (شکل ۲). همچنین برای کنترل مثبت از پلاسمید دیگری که حاوی ژن مورد نظر بود استفاده شد.



شکل ۲- تایید حضور ژن لاکاز در پلاسمیدهای استخراج شده با استفاده از PCR بر روی پلاسمیدهای PUC-LCC: چاهک ۱) GenRuler#SM0331 DNA Ladder Mix؛ چاهک ۲) کنترل مثبت (TA-LCC)؛ چاهک ۳ و ۴) محصول PCR.

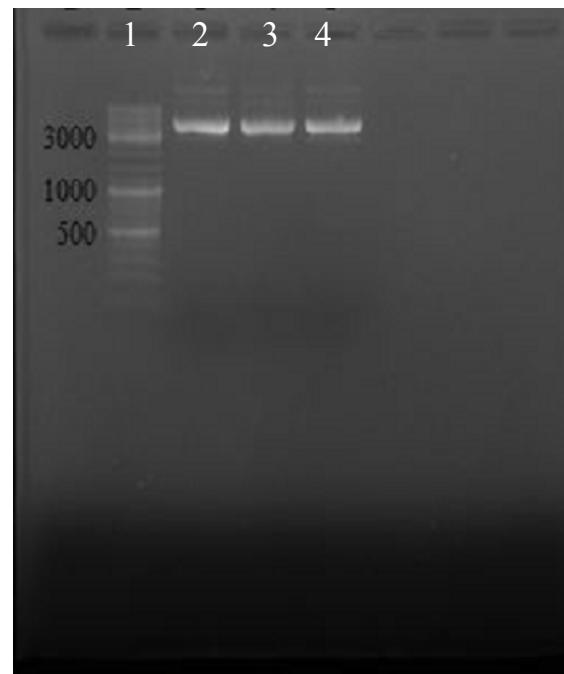
برای انتقال ژن لاکاز ابتدا هضم آنزیمی با آنزیم‌های محدود کننده *KpnI* و *XhoI* بر روی پلاسمید pPinkα-HC انجام شد. این کار جهت تولید پلاسمید خطی pPinkα-HC با دو انتهای مربوط به این آنزیم‌ها انجام شد. سپس پلاسمید PUC-LCC نیز با استفاده از همین آنزیم‌ها مورد هضم آنزیمی قرار گرفت و در نهایت پلاسمید بیانی و ژن لاکاز از روی ژل آگارز مورد بازیابی قرار گرفتند. برای اطمینان از اینکه DNAها در مراحل خالص‌سازی از دست نرفته باشند، محصول خالص‌سازی‌ها بر روی ژل آگارز برد شد (شکل ۳) و وجود باندهای مربوط به ژن لاکاز و پلاسمید خطی شده pPinkα-HC حاکی از صحت مرحله خالص‌سازی بود.

جدول ۱- مواد لازم جهت آماده‌سازی محلول سنجش فعالیت آنزیمی با سوبسترات سرین گالدازین

ردیف	ماده مورد استفاده	نمونه شاهد	نمونه تست
۱	آب دیونیزه	۵۰۰ µl	-
۲	بافر	۲/۲ ml	۲/۲ ml
۳	محلول آنزیمی	-	۵۰۰ µl
۴	سرین گالدازین	۳۰۰ µl	۳۰۰ µl

## نتایج و بحث

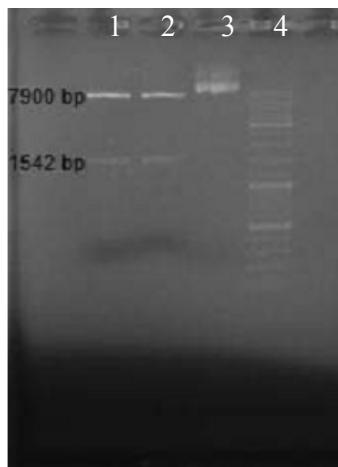
پلاسمید PUC-LCC بعد از تکثیر در میزبان باکتریابی با استفاده از آنزیم‌های محدود کننده *XbaI* و *KpnI* مورد هضم آنزیمی و PCR همچنین با استفاده از آغازگرهای اختصاصی در واکنش مورد تکثیر قرار گرفت. از باکتری‌های تواریخت شده استخراج پلاسمید انجام شد و برای تعیین کیفیت پلاسمیدها، دو میکرو لیتر از نمونه استخراج شده بر روی ژل آگارز یک درصد برد شد (شکل ۱).



شکل ۱- استخراج پلاسمید PUC-LCC از باکتری‌های تواریخت شده. چاهک ۱) GenRuler#SM0331 DNA Ladder Mix. چاهک ۲، ۳ و ۴) PUC-LCC پلاسمید.

تایید حضور ژن لاکاز در پلاسمیدهای PUC-LCC توسط PCR بر روی پلاسمیدهای استخراج شده PUC-LCC جهت تایید

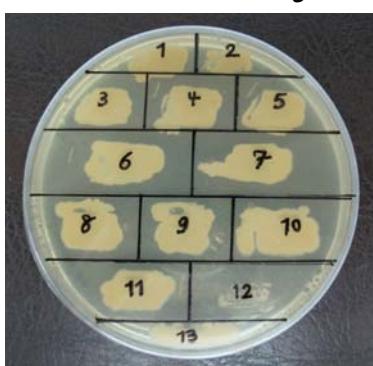
برای کنترل نهایی هضم آنزیمی با آنزیم‌های محدود کننده *XhoI* و *KpnI* بر روی پلاسمیدهای pPinkα-HC-LCC انجام شد و محصول بر روی ژل آگارز یک درصد برده شد و اندازه باندهای حضور ژن لاکاز را تایید کرد (شکل ۵)



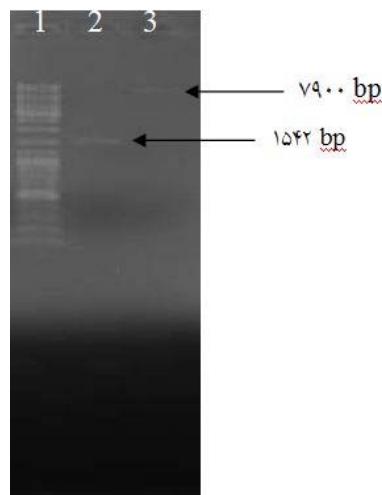
شکل ۵- هضم آنزیمی پلاسمید pPinkα-HC-LCC با آنزیم‌های محدود کننده *XhoI* و *KpnI*: چاهک ۱ و ۲) هضم آنزیمی پلاسمید با آنزیم‌های GenRuler#SM0331 چاهک ۳) پلاسمید هضم نشده؛ چاهک ۴) HC

DNA Ladder Mix

از آنجا که پلاسمیدهای pPinkα-HC-LCC از طریق نوترکیبی هومولوگ وارد زنوم مخمر خواهند شد، ابتدا پلاسمیدها با آنزیم محدود کننده *BspTI* خطی شدند و سپس با استفاده از روش الکتروپوریشن پلاسمید pPinkα-HC-LCC به داخل مخمر پیکیا پاستوریس انتقال یافت. مخمرهای تاریخت شده بر روی محیط انتخابی PAD برده شدند و ۳ تا ۵ روز بعد از کلونی‌های بدست آمده پلیت Master بر روی همین محیط‌های انتخابی حاوی آمپیکین تهیه شد (شکل ۶).



شکل ۶- یکی از پلیت‌های Master تهیه شده از مخمرهای تاریخت شده پیکیا پاستوریس در محیط انتخابی PAD+ampicillin

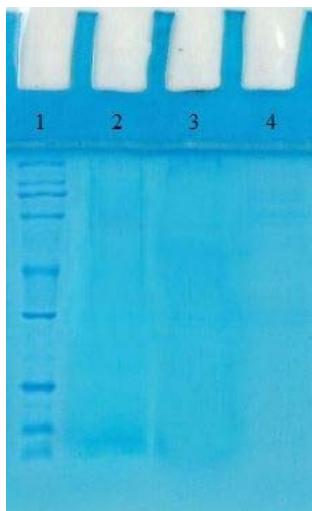


شکل ۳- پلاسمید pPinkα-HC بریده شده با آنزیم‌های محدود کننده، چاهک ۱) *KpnI* و ژن لاکاز خالص‌سازی شده از روی ژل آگارز. چاهک ۲)، GenRuler#SM0331 DNA Ladder Mix چاهک ۳) ژن لاکاز بریده شده با آنزیم‌های محدود کننده *XhoI* و *KpnI* که از روی ژل آگارز خالص‌سازی شده است.

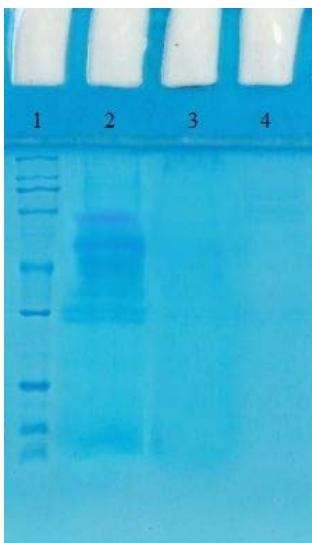
برای تایید حضور ژن لاکاز در پلاسمید بیانی و اطمینان از اتصال صحیح ژن در آن با استفاده از PCR از روش کلونی استفاده شد. نتایج کلونی PCR بر روی ژل آگارز برده شده و در شکل ۴ نتایج آن نشان داده شد.



شکل ۴- محصول کلونی PCR. چاهک ۱) کنترل مثبت (پلاسمید-*PUC*); چاهک ۲ الی ۸) نمونه‌های کلون‌ها؛ چاهک ۹) کنترل منفی (فاقد نمونه DNA); چاهک ۱۰) DNA Ladder Mix



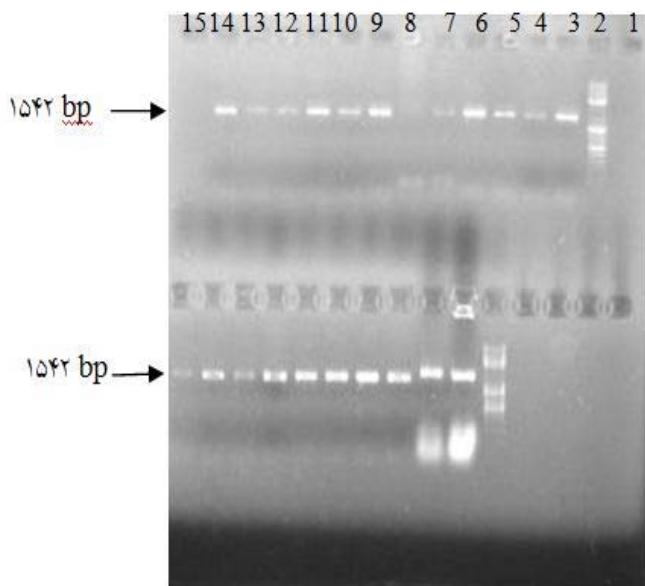
شکل-۸- ژل SDS-PAGE از سوپرناتانت‌های محیط بیانی با غلظت یک میلی مولار از سولفات مس. چاهک (۱) مارکر پروتئینی؛ چاهک (۲) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۰ درجه سانتی گراد، چاهک (۳) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۵ درجه سانتی گراد و چاهک (۴) سوپرناتانت محیط بیانی ۳۰ درجه سانتی گراد.



شکل-۹- ژل SDS-PAGE از سوپرناتانت‌های محیط بیانی با غلظت ۱/۵ میلی مولار از سولفات مس؛ چاهک (۱) مارکر پروتئینی؛ چاهک (۲) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۰ درجه سانتی گراد؛ چاهک (۳) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۵ درجه سانتی گراد؛ چاهک (۴) سوپرناتانت محیط بیانی ۳۰ درجه سانتی گراد.

که نمونه بیان شده در درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی گراد باند مربوط به پروتئین لاکاز را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). سوپرناتانت حاصل با استفاده از دستگاه تغليظ کننده، به میزان نصف حجم اولیه تغليظ شدند و سپس با استفاده از کیت شرکت اينويتروژن مورد آزمایش تاخورددگی مجدد قرار گرفتند. در نهایت

برای تایید حضور ژن لاکاز در کلونی‌های مخمر نوترکیب، از کلونی‌های رشد کرده بر روی پلیت Master استفاده شد و به صورت مستقیم، Colony-PCR انجام شد. محصول PCR بر روی ژل آگارز یک درصد برد شد و با رویت باند مربوط به ژن لاکاز حضور ژن در مخمرها تایید شد (شکل ۷).



شکل-۷- Colony-PCR بر روی کلونی‌های پیکیا پاستوریس نوترکیب. از بالا و راست. چاهک (۱) کترل منفی (فاقد نمونه DNA)؛ چاهک (۲) GenRuler#SM0331 DNA Ladder Mix؛ چاهک (۳) کترل مثبت (پلاسمید PUC-LCC)؛ چاهک (۴) الی ۱۵ و چاهک‌های پایینی محصولات Colony-PCR.

نتایج سنجش فعالیت آنزیمی همراه با سوپرناتانت‌ها و محلول حاصل از شکست دیواره مخمر پیکیا پاستوریس و سوبسترای سرین گالدازین حاکی از عدم وجود فعالیت آنزیمی داشت. از همین رو در مرحله بعد محلول‌های بدست آمده به وسیله ژل پلی آکریل آمید تجزیه شد و باند مربوط به پروتئین لاکاز مشاهده نشد (شکل ۸ و ۹).

سنجدش فعالیت آنزیمی با استفاده از سوبسترای سرین گالدازین، سوپرناتانت‌های بدست آمده و محلول‌های حاصل از شکست دیواره مخمر پیکیا انجام شد. منحنی فعالیت آنزیمی حاصل از روش طیف سنجی حاکی از عدم وجود فعالیت آنزیمی در هر سه دما بود. نتایج به دست آمده از تجزیه ژل پلی آکریل آمید نشان داد

قرار گرفتند و نتایج نشان دهنده عدم وجود فعالیت آنزیمی داشت. این موضوع می تواند به دلایل زیر باشد:

(الف) میزان پروتئین ترشح شده کم بوده و بنابراین به سختی قابل شناسایی است؛ (ب) پروتئین قادر به ترشح نیست و در سلول باقی میماند؛ (ج) پروتئین ترشح شده ناپایدار بوده و تحت تاثیر پروتئازها تخریب می شود؛ (د) مرحله ترشح پروتئین نسبت به درجه حرارت حساس می باشد؛ (ه) حساسیت نسبت به غلظت متابول (به دلیل تاثیر بر روی پایداری و تاخور دگی صحیح پروتئین)؛ و عدم تاخور دگی صحیح پروتئین.

Feng Hong et al. (2002) سه راهکار را برای افزایش تولید پروتئین و همچنین افزایش فعالیت آنزیمی لاکاز در مخمر پیکیا پاستوریس گزارش کردند بدین ترتیب که در راهکار اول دمای بیان ۳۰ درجه سانتی گراد و غلظت متابول یک درصد در نظر گرفته شد، در راهکار دوم دمای بیان ۲۰ درجه سانتی گراد و غلظت متابول یک درصد و نهایتاً در راهکار سوم دمای بیان ۲۰ درجه سانتی گراد و غلظت متابول ۰/۵ درصد در نظر گرفته شد. در نهایت راهکار سوم بهترین نتیجه را از نظر میزان پروتئین قابل حل و فعالیت ویژه آنزیم داشت. نتایج نشان داد که آنزیم در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد که دمای بهینه برای رشد پیکیا پاستوریس است، تا حد زیادی فعالیت خود را از دست می دهد. در این تحقیق نیز برای بهبود فعالیت آنزیمی و بهبود تولید پروتئین لاکاز در مخمر پیکیا پاستوریس راهکارهای زیر انجام شد:

(الف) سوپرناتانت های بدست آمده قبل از سنجش فعالیت آنزیمی تعطیف شدند.

(ب) برای کسب اطمینان از اینکه پروتئین در داخل سلول به دام نیفتاده باشد، دیواره مخمر شکسته شده و کل پروتئین آن بررسی شد.

(ج) بیان در حضور مخلوطی از مهارکننده های پروتئازها مانند PMSF تکرار شد.

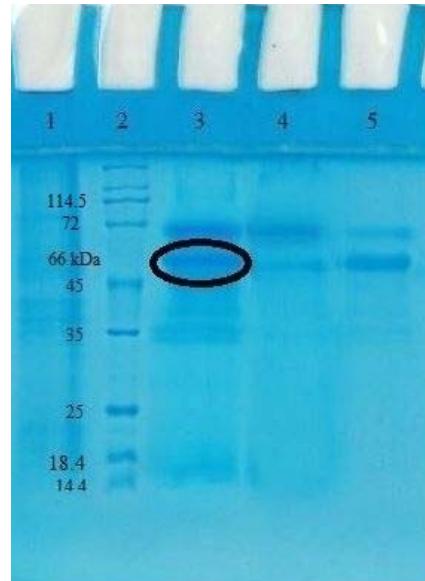
(د) بیان در دماهای پایین تکرار شد.

(ه) بهترین غلظت از سولفات مس برای بدست آوردن بیشترین فعالیت دو میلی مولار در نظر گرفته شد.

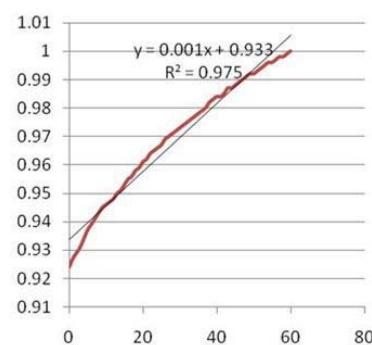
(و) تاخور دگی مجدد سوپرناتانت های بدست آمده انجام شد.

(ز) دیالیز سوپرناتانت نیز انجام شد.

سوپرناشون حاصل از فرآیند تاخور دگی مجدد و تعطیف با استفاده از سویسترای سرین گالدادزین مورد سنجش فعالیت آنزیمی قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان دهنده برگشت فعالیت آنزیمی داشت (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- ژل SDS-PAGE از سوپرناتانت های محیط بیانی با غلظت دو میلی مولار از سولفات مس؛ چاهک (۱) پروتئین های ترشحی پیکیا پاستوریس پذیرنده وکتور خالی pPink (کنترل منفی)؛ چاهک (۲) مارکر پروتئینی؛ چاهک (۳) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۰ درجه سانتی گراد؛ چاهک (۴) سوپرناتانت محیط بیانی ۲۵ درجه سانتی گراد؛ چاهک (۵) سوپرناتانت محیط بیانی ۳۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۱۱- سنجش فعالیت آنزیمی با استفاده از سویسترای سرین گالدادزین و روش طیف سنجی) شب خط حاصل از میزان جذب در طول ۶۰ ثانیه همراه با سویسترای سرین گالدادزین.

سوپرناتانت های بدست آمده از محیط کشت ۳۰ درجه سانتی گراد در مخمر پیکیا پاستوریس از نظر فعالیت آنزیمی مورد سنجش

بیشتری داشته و متعاقب آن مشکلات زیادی را هم پیش روی دارد. با انتخاب مخمر پیکیا پاستوریس و با توجه به متفاوت بودن مولکول‌های چاپرون درگیر در تاخوردگی پروتئین‌ها و تغییرات بعد از ترجمه و همچنین این موضوع که پروتئین‌های نوترکیب تولید شده در مخمر پیکیا پاستوریس عمدتاً از نوع ترشحی خواهد بود انتظار می‌رفت که مشکل عدم تاخوردگی صحیح پروتئین لاکاز در میزبان باکتریایی، در میزبان مخمر حل شود. به نظر می‌رسد که اگر پروتئین در سیتوزول به صورت نامناسبی تاخورده باشد، تا حد زیادی توانایی عبور از غشا را از دست خواهد داد. البته کارایی مولکول‌های چاپرون در چنین زمانی بسیار تعیین‌کننده خواهد بود چرا که یک پروتئین برای اینکه بتواند از غشا عبور کند، باید به شکل تاخورده نگه داشته شود و سپس در سمت دیگر غشا برای انجام فعالیت زیستی خود به صورت مناسبی تا بخورد و این مهم به وسیلهٔ مولکول‌های چاپرون انجام می‌شود؛

ب) بررسی تاثیرات تغییرات بعد از ترجمه بر روی تولید پروتئین لاکاز در مخمر پیکیا پاستوریس. یکی از مهمترین تغییرات بعد از ترجمه که بررسی اثرات آن بر روی تولید آنژیم لاکاز در مخمر پیکیا پاستوریس مطرح بود، گلیکوزیلاسیون از نوع N بود. نتایج حاصل از ژل SDS-PAGE نشان داد که گلیکوزیلاسیون چندان زیادی بر روی پروتئین لاکاز انجام نشده است؛

ج) بررسی غلط‌های مختلف سولفات مس بر روی تولید پروتئین لاکاز. در بعضی موارد، پیوند یون فلزی به پروتئین موجب تقویت پایداری ساختاری آن می‌شود و یا به عنوان کوفاکتور در تولید آنژیم فعال نقش ایفا می‌کند. حضور یون مس در ساختار آنژیم لاکاز و نقش آن در تنظیم فعالیت آنژیم، این یون را به عنوان یک کوفاکتور حیاتی برای آنژیم لاکاز مطرح می‌کند. نحوه اثر یون مس بر روی آنژیم لاکاز هنوز به صورت جزئی مورد مطالعه قرار نگرفته است اما این موضوع به اثبات رسیده است که زمان اضافه کردن سولفات مس و غلط آن در رسیدن به سطوح بالای لاکاز فعال بسیار مهم و تعیین کننده است. در مخمر پیکیا پاستوریس و هانسنولا پلی مرفا، سولفات مس در غلط دو میلی‌مولار و در محیط بیانی (قبل از شروع فاز ساکن) اضافه شد؛

A.I. Ruiz et al. (2000) نشان دادند که پیش تیمار سوپرناتانت با دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش فعالیت آنژیمی می‌شود. در این تحقیق این راهکار نیز باعث احیای فعالیت آنژیمی لاکاز نشد.

امروزه از میکروارگانیسم‌های مختلفی مثل باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها برای تولید آنژیم‌ها استفاده می‌شود. به طور سنتی، برای بیان پروتئین‌های فاقد گلیکوزیلاسیون از *E. coli* استفاده می‌کنند، اما برای تولید پروتئین‌های دارای گلیکوزیلاسیون از سیستم‌های باکتریایی نمی‌توان استفاده کرد. قارچ‌ها نیز رشد نسبتاً کندی دارند. امروزه مخمر به عنوان یک سیستم بیانی بسیار مناسب و مقرن به صرفه مورد توجه محققان قرار گرفته است. مخمر پیکیا پاستوریس یک سیستم موفق برای بیان ژن‌های هترولوگ به شمار می‌آیند. این موفقیت مرهون وجود چند عامل است. یکی وجود پروموتورهای قوی و قابل تنظیم است که به گونه‌ای منحصر به فرد برای کنترل بیان ژن‌های خارجی مناسب به شمار می‌آید. سادگی تکنیک و کار کردن با این مخمر نسبت به مخمرهایی مانند ساکارومایسین سرویزیه نیز از دلایل توجه به آنهاست. آمادگی بالای این مخمرها به رشد در محیط هوایی، کشت و بازدهی تولید پروتئین در آنها را به گونه چشمگیری افزایش داده است. عوامل تاثیر گذار بر روی تولید پروتئین نوترکیب لاکاز در مخمر پیکیا به شرح ذیل هستند:

الف) مشکل عدم تاخوردگی صحیح پروتئین لاکاز در میزبان باکتریایی. بسیاری از پروتئین‌ها بعد از خالص‌سازی در محیط آزمایشگاهی به صورت خود به خودی تا می‌خورند و ساختار سه بعدی پروتئین را تشکیل می‌دهند. شکل‌گیری ساختار سه بعدی پروتئین تا حد زیادی تحت تاثیر عوامل محیطی است. در شرایط آزمایشگاهی، گاهی اوقات به علت کم محلول بودن زنجیره‌های پلی‌پیتیدی غیر طبیعی و احیا شده، تشکیل پیوند دی سولفیدی مشکل می‌شود و به نظر می‌رسد که این امر در پروکاریوت‌ها و میزبان‌های پروکاریوتی با فراوانی بیشتری اتفاق می‌افتد. انتخاب ژن‌های مورد نیاز، وارد کردن آنها در میزبان‌های معین، بدست آوردن و تخلیص محصول ژنی، در صورتی که کارایی لاکاز را داشته باشد (پروتئین به صورت صحیح تا خورده باشد) از جمله مراحلی است که هر یک در مقیاس صنعتی جزئیات کاری

پیکیا پاستوریس بیان کردند. استفاده از محیط کشت با pH 6 و کنترل pH در طول مدت زمان کشت برای بدست آورن فعالیت ضروری تشخیص داده شد. در این تحقیق نیز سنجش فعالیت آنزیمی در pH های مختلف انجام شد. (Liu W et al. 2003) نیز بعد از کلون کردن و تعیین خصوصیات آنزیمی لاکاز از میزان قارچ *Lignosus*. آن را در پیکیا پاستوریس بیان کردند. حضور مس در غلظت  $0.4\%$  میلی مولار برای بدست آمدن فعالیت بهینه به اثبات رسید و بیشترین فعالیت هم به میزان در دمای  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد حاصل شد.

#### منابع

- Dalfard A, Khajeh K, Soudi M, Naderi-Manesh H, Ranjbar B, Sajedi R (2006) Isolation and biochemical characterization of laccase and tyrosinase activities in a novel melanogenic soil bacterium. Enzyme and Microbial Technology 39: 1409-1416.
- Gianfreda L, Xu F, Bollag J (1999) Laccases: a useful group of oxidoreductive enzymes. Bioremediation Journal J 3: 1-26.
- Heinzkill M, Bech L, Halkier T, Schneider P, Anke T (1998) Characterization of laccases and peroxidases from wood-rotting fungi (family Coprinaceae). Applied and Environment Microbiology 64: 1601-1606.
- Hong F, Meinander N, Jönsson L (2002) Fermentation strategies for improved heterologous expression of laccase in *Pichia pastoris*. Bioelectrochemistry and Bioenergetics 79: 438-449.
- Kunamneni A, Ballesteros A, Plou F, Alcalde M (2007) Fungal laccase a versatile enzyme for biotechnological applications. Applied Microbiology and Biotechnology 1: 233-245.
- Leontievsky A, Myasoedova N, Baskunov B, Evans C, Golovleva L (2000) Transformation of 2, 4, 6-trichlorophenol by the white rot fungi *Panus tigrinus* and *Coriolus versicolor*. Biodegradation 11: 331-340.

(d) بررسی اثرات درجه حرارت محیط بیانی بر روی تولید آنزیم لاکاز. (Feng Hong et al. 2002) در تحقیقی نشان دادند که فعالیت آنزیم لاکاز به خصوص فعالیت ویژه آن می تواند بوسیله کاهش دمای محیط بیان بهبود پیدا کند. مکانیسم هایی که منجر به اثرات درجه حرارت بر روی فعالیت آنزیم لاکاز می شود، می تواند به عواملی مانند کاهش پایداری، آزادسازی بیشتر پروتازها از سلول های مرده و مشکلات تاخوردگی، همگی در درجه حرارت های بالا نسبت داده شود.

*Trametes* Leif Johnson et al. (1997) با استفاده از روش RT-PCR جدا کردن و در مخمر *versicolor*

- Levine D, Cooney C (1973) Isolation and characterization of a thermotolerant methanol-utilizing yeast. Applied Microbiology and Biotechnology 26: 982-990.
- Liu W, Chao Y, Liu S, Bao H, Qian S (2003) Molecular cloning and characterization of a laccase gene from the basidiomycete *Fome lignosus* and expression in *Pichia pastoris*. Applied Microbiology and Biotechnology 63: 174-181.
- Ruiz A, Malave I, Felby A, Griebnow C (2000) Improved activity and stability of an immobilized recombinant laccase in organic solvents. Biotechnology Letters 22: 229-233.
- Shin K, Lee Y (2000) Purification and Characterization of a New Member of the Laccase Family from the White-Rot. Archives of Biochemistry and Biophysic 384: 109-115.
- Thurston C (1994) The structure and function of fungal laccases. Microbiological Research 140: 19-26.
- Xu F (1996) Oxidation of phenols, anilines, and benzenethiols by fungal laccases: correlation between activity and redox potentials as well as halide inhibition. Biochemical Journal 35: 7608-7614.
- Yaropolov, Skorobogat O, Vartanov S, Varfolomeyev S (1994) Laccases. Applied Biochemistry and Biotechnology 49: 257-280.