به نام خالق زیبایی ها
دانشگاه تربیت مدرس

اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

تخمیر حالت جامد: راهکاری پایدار برای ارزش‌افزایی ضایعات کشاورزی-صنعتی

هانیه باقری کیا[۱]، زهره حمیدی اصفهانی[۲*]،محمد امیر کریمی ترشیزی[۳]

۱- دانشجوی دکتری ،گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲-استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳-دانشیار، گروه پرورش و مدیریت طیور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
*نویسنده مسئول: Hamidy_z@modares.ac.ir

کدمقاله EFAB01583159

اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

چکیده

فناوری تخمیر حالت جامد (SSF) یک فرآیند زیستی کارآمد است که به دلیل مزایای برجسته‌ای همچون مصرف انرژی کمتر، بازده بالاتر، تولید ناچیز پساب و ریسک آلودگی پایین، به عنوان جایگزینی برتر برای تخمیر غوطه‌ور مطرح می‌شود. این مقاله مروری، کاربردهای کلیدی این فناوری را مورد بررسی قرار می‌دهد. در حوزه صنعتی، SSFدر تولید آنزیم‌هایی مانند آمیلاز و لیپاز بسیار موفق بوده است. در صنایع غذایی و خوراک دام، این فرآیند با کاهش ترکیبات ضدمغذی (مانند فیتات)، ارزش تغذیه‌ای و قابلیت هضم را افزایش داده و خواص عملکردی و آنتی‌اکسیدانی محصولات را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، پتانسیل بالای SSF در کشاورزی پایدار از طریق تولید کودهای زیستی، آفت‌کش‌های بیولوژیک و هورمون‌های رشد گیاهی، آن را به یک فناوری کلیدی تبدیل کرده است SSF با استفاده از ضایعات کشاورزی-صنعتی به عنوان سوبسترا، راهکاری اقتصادی و پایدار برای تولید محصولات با ارزش افزوده ارائه می‌دهد.

.

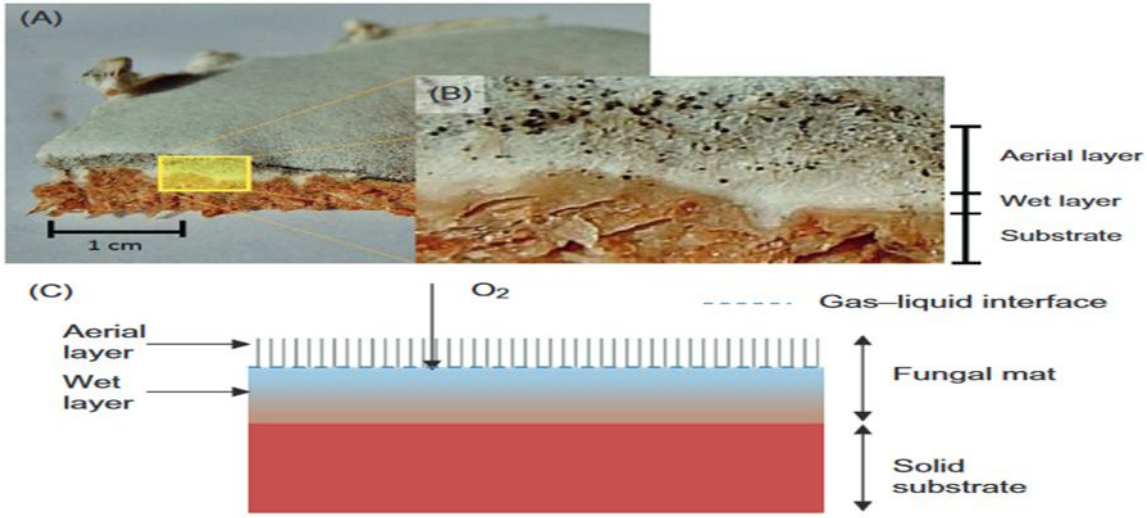
کلید واژه‌ها:تخمیر حالت جامد، ضایعات کشاورزی و صنعتی، کاهش ترکیبات ضدمغذی ، غنی‌سازی تغذیه‌ای، محصولات زیستی

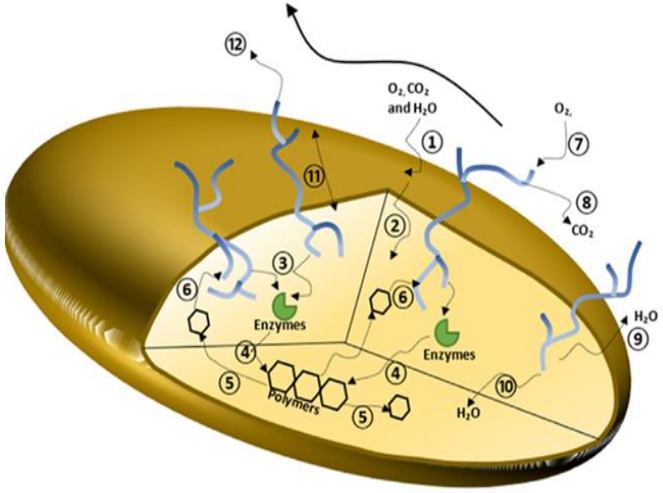
مقدمه

- تخمیر یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای نگهداری مواد غذایی و تولید ترکیباتی مانند اتانول است.
- امروزه تخمیر در صنایع غذایی، دارویی و زیست‌فناوری اهمیت زیادی پیدا کرده است.
- این فرآیند می‌تواند موجب تولید ترکیبات زیست‌فعال مانند آنتی‌اکسیدان‌ها شود.
- تخمیر امکان استفاده مجدد از ضایعات کشاورزی و صنعتی را فراهم می‌کند.
- استفاده از این روش باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی و مدیریت پسماندها می‌شود.
- روش‌های اصلی تخمیر شامل:
- تخمیر غوطه‌ور (SmF)
- تخمیر حالت جامد (SSF)

مقدمه

- تخمیر حالت جامد فرآیندی است که در آن موادی که استفاده می شود غیرمحلول می باشد واین موادغیرمحلول به عنوان سوبسترا استفاده می شوند.
- ۲نقش موادغیرمحلول
  - ۱- لنگرگاه (ساپورت فیزیکی)
  - ۲-منبع غذایی
- در سیستم تخمیر به حالت جامد موادغذایی مرطوب هستند ولی فاقد آب آزاداند ← مناسب قارچ ها ومخمرها و تعداد بسیار کمی از باکتری های پروبیوتیک





تخمیر در حالت جامد	تخمیر در حالت مایع
آب آزاد وجود ندارد	آب آزاد بسیار وجود دارد
عمق کم محیط کشت	عمق زیادمحیط کشت
مواد جامد مغذی توسط یک ماده جامد به صورت غیرمحلول تامین می شود	منابع غذایی محلول درآب هستند وبه صورت جدا جدا درآب حل می شوند .
با پیشرفت تخمیر شیب های موادغذایی افزایش می یابد	چون همزدن در اینجا داریم با گذشت زمان شیب موادمغذی نداریم
مقدار آب محدود است (حجم فرمانتورکم هست)	مقدار آب بسیار زیاد است(حجم فرمانتور زیاد هست)
سه فاز در کنارهم قرار دارند	دو فاز قراردارد
آب به صورت غیر مداوم	آب به صورت مداوم و پیوسته
عدم حساسیت به سترون بودن محیط	حساسیت زیاد به سترون بودن محیط
عدم کنترل پارامترهای تخمیربه جز مقدار رطوبت –میزان اکسیژن-حذف حرارت تولیدی	کنترل شدید روی همه پارامترهای تخمیر مانند دما-موادمغذی -pH
میزان بسیارزیاد تلقیح	میزان کم تلقیح
تامین اکسیژن از فاز گازی مجاور سوبسترا و خیلی کم از اکسیژن محلول در آب	تامین اکسیژن از طریق اکسِیژن محلول درآب
هوادهی در این روش به منظور تامین کننده اکسیژن-حذف حرارت تولیدی-کاهش گازهای تولیدی در سیستم	هوادهی به منظور تامین اکسیژن-کاهش گازهای تولیدی
همزدن اختیاری	همزدن اجباری
محصول تخمیر یک ماده جامد مرطوب ودارای غلظت بالایی از محصول	محصول تخمیر محلول وغلظت کمی دارد ومقدارزیادی ازمحصول ما آب تشکیل می دهد.
ابتدا میکروارگانیسم ها در سطح رشد می کنند و بعد به داخل موادجامد نفوذ می کند.	چون همزدن داریم میکروارگانیسم ها به صورت یکنواخت در محیط کشت توزیع می شوند.

سوبستراهای مورد استفاده

- غلات: برنج، گندم، جو، ذرت
- سبوس گندم و سبوس برنج
- مواد لیگنوسلولزی
- ضایعات کشاورزی و صنعتی

عوامل موثر بر روی انتخاب سوبسترا

۱- اندازه ذرات
- ۱- نسبت سطح به حجم
- ۲- تراکم ذرات

۲- یکنواختی ذرات

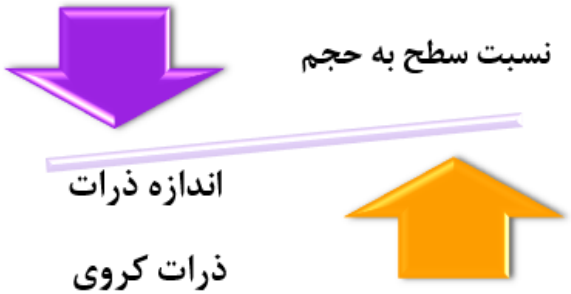
۳- شکل ذرات
- ۱- نسبت سطح به حجم
- ۲-تراکم ذرات

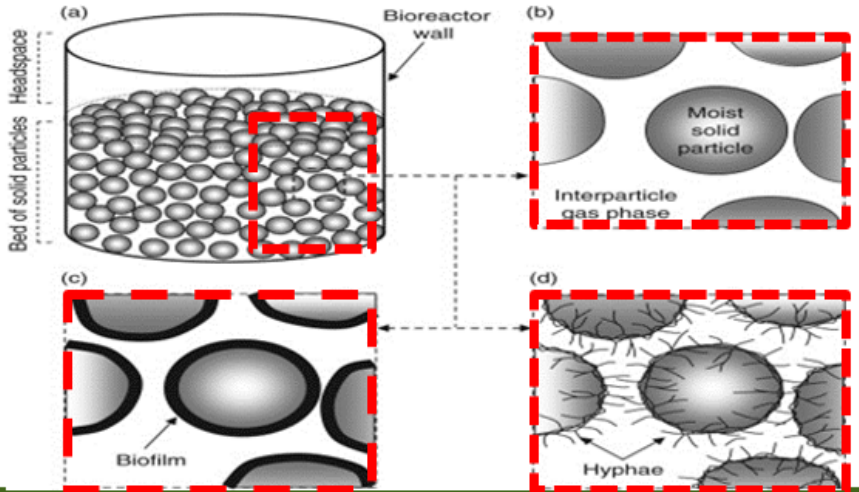
۴-خلل وفرج:به ساختمان داخلی سوبسترا بستگی دارد (خصوصیات ذاتی)

۵-استحکام ذرات

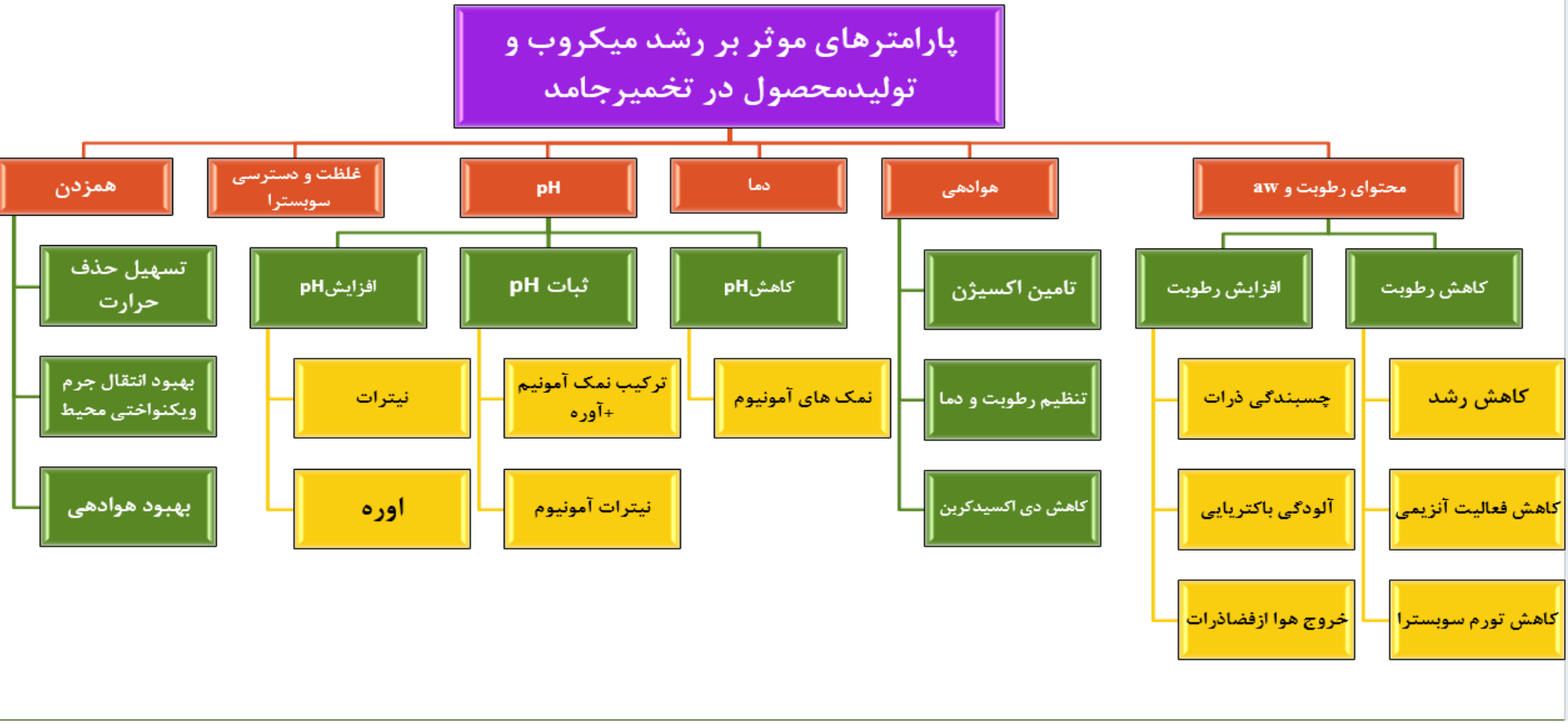
۶-ترکیب شیمیایی

۷- قیمت و دسترسی





مزایای تخمیر جامد	معایب تخمیرجامد
محیط کشت خیلی ساده و ارزان(ضایعات موادغذایی)	محدودیت استفاده از میکروارگانیسم ها(قارچ ها)
هزینه های پایین سرمایه گذاری و نیازمندی کم انرژی	عدم اندازه گیری آنلاین پارامترهای تخمیر به دلیل وجود شیب های مختلف (pH-دما-موادغذایی)
حجم کم فاضلاب خروجی و فرمانتور	اندازه گیری مشکل کنتیک رشد
احتمال پایین آلودگی ثانویه	حذف بسیارمشکل حرارت تولیدی
راه اندازی سریع و بدون نیاز به افرادی بامهارت بالا	انتقال جرم درمحیط جامدبه صورت نفوذ وآهسته صورت می گیرد ← رشد به کندی صورت می گیرد
وجودهمه انواع شکل های قارچ ها مانند اسپور وحالت رویشی	عدم وجود معیاری برای طراحی راکتور وبهینه کردن فرآیند
سادگی و هزینه پایین مرحله down stream	کاهش بهره وری به دلیل رشد کم وزمان تخمیرزیاد
تولیدبسیاربالای محصول	راندمان= مقدار تولید محصول / مقدارسوبسترای مصرفی در زمان
تفاوت در ویژگی محصول تولیدی(پایداری بالا در دما وpHهای مختلف)	


پارامترهای موثر بر رشد میکروب و تولیدمحصول در تخمیرجامد
محتوای رطوبت و aw
هوادهی
دما
pH
غلظت و دسترسی سوبسترا
همزدن
کاهش رطوبت
افزایش رطوبت
تامین اکسیژن
کاهش pH
ثبات pH
افزایش pH
تسهیل حذف حرارت
کاهش رشد
چسبندگی ذرات
تنظیم رطوبت و دما
نمک های آمونیوم
ترکیب نمک آمونیم +آوره
نیترات
بهبود انتقال جرم ویکنواختی محیط
کاهش فعالیت آنزیمی
آلودگی باکتریایی
کاهش دی اکسیدکربن
نیترات آمونیوم
اوره
بهبود هوادهی
کاهش تورم سوبسترا
خروج هوا ازفضاذرات

مراحل فرآیند تخمیر جامد

۱ تهیه کردن سوبسترا(کاهش اندازه-پیش تیمارفیزیکی ,شیمیایی,بیولوژیکی-اضافه کردن مواد مغذی)

۲ استریلیزاسیون یا پخت(ازبین رفتن میکروارگانیسم های نامطلوب و افزایش جذب رطوبت توسط موادجامد)

۳ تلقیح میکروارگانیسم

۴ گرمخانه گذاری

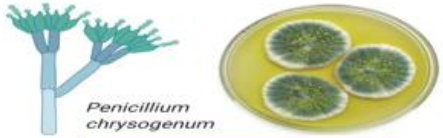
۵ برداشت محصول
خشک کردن, خالص سازی ,بسته بندی و تصفیه فاضلاب

اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵
ISC

کاربردهای تخمیرجامد

تجزیه مواد سمی محیط

محصولات با ارزش زیستی

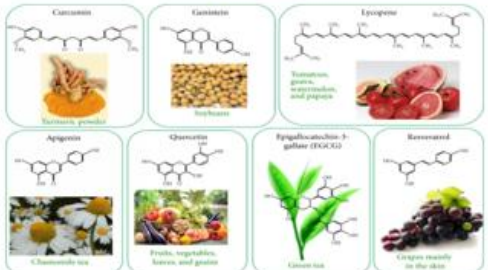


تبدیل ضایعات موادغذایی به مواد با ارزش

آنزیم

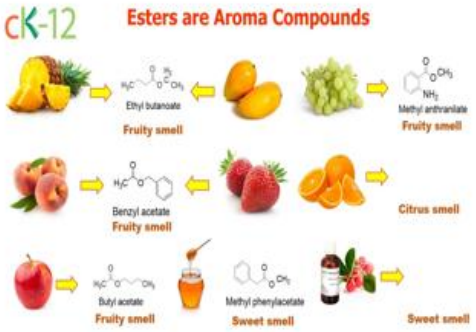
تولید اسیدهای آلی

کاهش مواد سمی در باقی مانده های کشاورزی



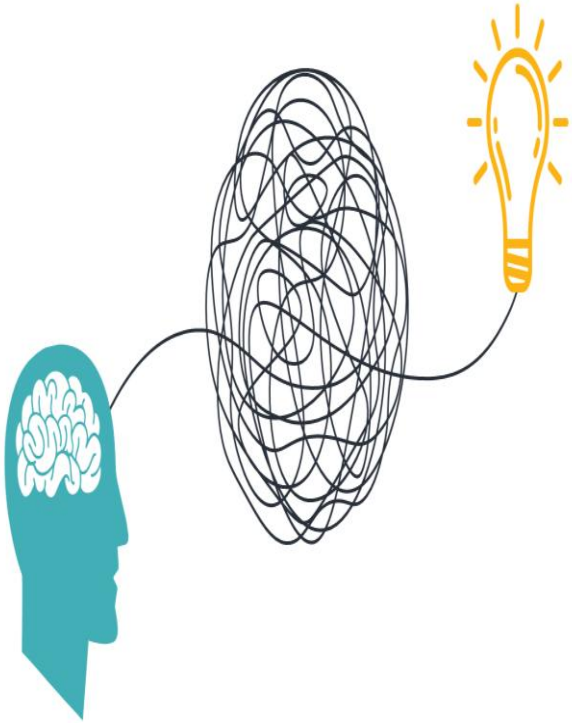
حشره کش های زیستی

ترکیبات عطروطعم



یافته های تحقیق

ردیف	کاربرد	توضیحات
۱	تولید آنزیم	افزایش تولید آمیلاز، سلولاز، پروتئاز و زایلاناز
۲	افزایش ارزش تغذیه‌ای	افزایش پروتئین، ویتامین‌های گروه Bو کاهش اسید فیتیک در غلات و حبوبات تخمیرشده
۳	افزایش قابلیت هضم و دسترسی زیستی	بهبود قابلیت هضم پروتئین و کاهش عوامل ضدتغذیه‌ای
۴	افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی	افزایش ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی
۵	اصلاح آرد	بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی، جذب آب و کیفیت نانوایی آردهای تخمیرشده
۶	محصولات زیستی خوراک دام	افزایش پروتئین، بهبود هضم و کاهش عوامل ضدتغذیه‌ای در خوراک دام



کاربرد SSF در تولید محصولات زیستی مختلف به طور گسترده ای گزارش شده است که شامل آنزیم ها، اسیدهای آلی، کودهای زیستی، آفت کش های زیستی، بیوسورفکتانت ها، بیواتانول، ترکیبات معطر، خوراک دام، رنگدانه ها، ویتامین ها و آنتی بیوتیک ها می شود.

پیشرفت در طراحی بایوراکتورها و تجهیزات تخمیر می تواند باعث پیشرفت این تخمیر وافزایش کاربرد آن شود

نتیجه گیری

استفاده از ضایعات موادغذایی در تخمیر جامد می تواند به کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود ارزش افزوده ضایعات کشاورزی کمک کند

منابع

1. Martins, S., Mussatto, S. I., Martínez-Avila, G., Montañez-Saenz, J., Aguilar, C. N., & Teixeira, J. A. (2011). Bioactive phenolic compounds: Production and extraction by solid-state fermentation. A review. *Biotechnology Advances*, *29*(3), 365–373.
2. Borrás, Elaine, L. M., Valiño, C., Elías, A., Martínez, J. J., Sanabria, A. M., & Mónica, L. (2020). Solid-state fermentation of post- harvest wastes of Solanum tuberosum and a microbial preparation. *Cuban Journal of Agricultural Science*, *54*(4).
3. Parmar, A., Patel, V., Usadadia, S., Rathwa, S., & Prajapati, D. (2019). A solid state fermentation, its role in animal nutrition: A review. *International Journal of Chemical Studies*, *7*(3), 4626–4633.
4. Zhang, D., Tan, B., Zhang, Y., Ye, Y., & Gao, K. (2022). Improved nutritional and antioxidant properties of hulless barley following solid-state fermentation with Saccharomyces cerevisiae and *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Food Processing and Preservation*, *46*(2), e16245.
5. Godoy, M. G., Amorim, G. M., Barreto, M. S., & Freire, D. M. (2018). Agricultural residues as animal feed: protein enrichment and detoxification using solid-state fermentation. In *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. 235–256). Elsevier.
6. Soares, V., Castilho, R., Bon, L., & Freire, E. (2005). High-Yield *Bacillus subtilis* Protease Production by Solid-State Fermentation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *121*.
7. Hölker, U., & Lenz, J. (2005). Solid-state fermentation - are there any biotechnological advantages. *Current Opinion in Microbiology*, *8*(3), 301–306.
8. López-Gómez, Manan, J. P., & Webb, M. A. (2020). *Solid-state fermentation of food industry wastes. Food Industry Wastes, 2ed.* 135–161.
9. Crafack, M., Keul, H., Eskildsen, C. E., Petersen, M. A., Saerens, S., Blennow, A., Skovmand-Larsen, M., Swiegers, J. H., Petersen, G. B., Heimdal, H., & Nielsen, D. S. (2014). Impact of starter cultures and fermentation techniques on the volatile aroma and sensory profile of chocolate. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, *63*, 306–316.

10. Krishna, C. (2005). Solid-state fermentation systems - an overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, *25*(1), 1–30.
11. Pandey, A. (1992). Recent process developments in solid-state fermentation. *Process Biochemistry*, *27*(2), 109–117.
12. Raimbault, M. (1998). General and microbiological aspects of solid substrate fermentation. *EJB Electronic Journal of Biotechnology*, *3*.
13. Figueroa-Montero, Esparza-Isunza, A., Saucedo-Castañeda, T., Huerta-Ochoa, G., Gutiérrez-Rojas, S., & Favela-Torres, M. (2011). Improvement of heat removal in solid-state fermentation tray bioreactors by forced air convection. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *86*(10), 1321–1331.
14. Finkler, A. T. J., Biz, A., Pitol, L. O., Medina, B. S., Luithardt, H., Luz, L. F., De, L., Krieger, N., & Mitchell, D. A. (2017). Intermittent agitation contributes to uniformity across the bed during pectinase production by *Aspergillus niger* grown in solid-state fermentation in a pilot-scale packed-bed bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, *121*, 1–12.
15. Karimi, A., Shojaosadati, S. A., Hejazi, P., Vasheghani-Farahani, E., & Hashemi, M. (2014). Porosity changes during packed bed solid-state fermentation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*(6), 4022–4027.
16. Zhao, H.-M., Guo, X.-N., & Zhu, K.-X. (2017). Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran. *Food Chemistry*, *217*, 28–36.
17. Sadh, P. K., Duhan, S., and Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, *5*(1), 1-15.
18. Nambi, V. E. (2017). Value addition of grains using solid state fermentation. *Nutrition & Food Science International Journal*, *3*(4).
19. Vandenberghe, L. P. S., Soccol, C. R., Pandey, A., & Lebeault, J. M. (2000). Solid-state fermentation for the synthesis of citric acid by Aspergillus niger. *Bioresource Technology*, *74*(2), 175–178.
20. Shukla, J., and Kar, R. (2006). Potato peel as a solid state substrate for thermostable α-amylase production by thermophilic Bacillus isolates. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *22*(5), 417-422.

21. Olakusehin, V. O., & Oyedeji, O. (2022). Production of α-amylase from Aspergillus flavus S2-OY using solid substrate fermentation of potato (Solanum tuberosum) peel. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(5), 1950–1967.
22. Liu, B., Li, Y., Song, J., Zhang, L., Dong, J., & Yang, Q. (2014). Production of single-cell protein with two-step fermentation for treatment of potato starch processing waste. Cellulose (London, England), 21(5), 3637–3645.
23. Maxwell, O. I., Chinwuba, U. B., and Onyebuchukwu, M. G. (2018). Protein enrichment of potato peels using *Saccharomyces cerevisiae* via solid-state fermentation process. *Advances in Chemical Engineering and Science*, *9*(1), 99-108.
24. Yang, A., Zuo, L., Cheng, Y., Wu, Z., Li, X., Tong, P., and Chen, H. (2018). Degradation of major allergens and allergenicity reduction of soybean meal through solid-state fermentation with microorganisms. Food and Function, 9(3), 1899-1909.
25. Calinoiu LF , Catoi AF, Vodnar DC. (2019). Solid-State Yeast Fermented Wheat and Oat Bran as A Route for Delivery of Antioxidants. Antioxidants, 8, 372;
26. Shokouhi, M., Hamidi-Esfahani, Z., & Karimi-Torshizi, M. A. (2024). Fungal Pretreatment Strategy to Enhance Growth of *Pediococcus acidilactici* via Solid-state Fermentation of Spent Malt Grain. *Applied Food Biotechnology, 11*(1), e32–e32.
27. Wang, S., Wu, Q., Nie, Y., Wu, J., & Xu, Y. (2019). Construction of synthetic microbiota for reproducible flavor compound metabolism in Chinese light-aroma-type liquor produced by solid-state fermentation. Applied and Environmental Microbiology, *85*(10), e03090–03018.

28. Yao ,Y., Zhang T. Z., Wang H. F., Liu J. X. (2017). Upgrading of by-product from beverage industry through solid-state fermentation with Candida utilis and Bacillus subtilis.
29. Santos, T .,Carvalho D., Devson P.,Palma G., Renata ,C ,F ,B., and Marcelo ,F. 2012. "Optimisation of Solid State Fermentation of Potato Peel for the Production of Cellulolytic Enzymes." *Food Chemistry* 133 (4): 1299–1304.
30. Hassaan, M. S., Soltan, M. A., & Abdel-Moez, A. M. (2015). Nutritive value of soybean meal after solid state fermentation with Saccharomyces cerevisiae for Nile tilapia, Oreochromis niloticus. *Animal Feed Science and Technology*, 201, 89–98.
31. Mao, M., Wang, P., Shi, K., Lu, Z., Bie, X., Zhao, H., Zhang, C., & Lv, F. (2020). Effect of solid state fermentation by Enterococcus faecalis M2 on antioxidant and nutritional properties of wheat bran. *Journal of Cereal Science*, 94(April), 102997.
32. Dai, C., Ma, H., He, R., Huang, L., Zhu, S., Ding, Q., & Luo, L. (2017). Improvement of nutritional value and bioactivity of soybean meal by solid-state fermentation with Bacillus subtilis. *LWT - Food Science and Technology*, 86, 1–7.
33. Dadkhodazadeh, V., Hamidi-Esfahani, Z., & Khan-Ahmadi, M. (2024). Improvement of the valuable compounds of fish waste through solid-state fermentation with probiotics. *Applied Food Research*, 4(2), 100534.
34. Tu, J., Zhao, J., Liu, G., Tang, C., Han, Y., Cao, X., Jia, J., Ji, G., & Xiao, H. (2020). Solid state fermentation by Fomitopsis pinicola improves physicochemical and functional properties of wheat bran and the bran-containing products. *Food Chemistry*, *328*(May), 127046.
35. Ibarruri, J., & Hernández, I. (2018). Rhizopus oryzae as fermentation agent in food derived sub-products. Waste and Biomass Valorization, 9(11), 2107-2115.
36. Le, M. H. A., Galle, S., Yang, Y., Landero, J. L., Beltranena, E., Gänzle, M. G., & Zijlstra, R. T. (2016). Effects of feeding fermented wheat with Lactobacillus reuteri on gut morphology, intestinal fermentation, nutrient digestibility, and growth performance in weaned pigs. *Journal of Animal Science*, 94(11), 4677–4687.

37. Koo, B., Kim, J. W., & Nyachoti, C. M. (2018). Nutrient and energy digestibility, and microbial metabolites in weaned pigs fed diets containing Lactobacillus–fermented wheat. *Animal Feed Science and Technology*, *241*, 27–37.
38. Liu, P., Zhao, J., Guo, P., Lu, W., Geng, Z., Levesque, C. L., Johnston, L. J., Wang, C., Liu, L., Zhang, J., Ma, N., Qiao, S., & Ma, X. (2017). Dietary corn bran frmented by Bacillus subtilis MA139 decreased gut cellulolytic bacteria and microbiota diversity in finishing pigs. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, *7*(DEC), 1–9.
39. Li, P. F., L. F. Xue, R. F. Zhang, X. S. Piao, Z. K. Zeng, and J. S. Zhan. (2011). "Effects of Fermented Potato Pulp on Performance, Nutrient Digestibility, Carcass Traits and Plasma Parameters of Growing-Finishing Pigs." *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 24 (10): 1456–63.
40. Zunong, Maimaijiang, Tuerxun Tuerhong, M. Okamoto, A. Hongo, and M. Hanada. (2009). "Effects of a Potato Pulp Silage Supplement on the Composition of Milk Fatty Acids When Fed to Grazing Dairy Cows." *Animal Feed Science and Technology* 152 (1–2): 81–91.
41. Sala, A., Vittone, S., Barrena, R., Sánchez, A., and Artola, A. (2021). Scanning agro-industrial wastes as substrates for fungal biopesticide production: Use of Beauveria bassiana and Trichoderma harzianum in solid-state fermentation. *Journal of Environmental Management*, 295, 113113.
42. Berikashvili, V., Sokhadze, K., Kachlishvili, E., Elisashvili, V., & Chikindas, M. L. (2018). Bacillus amyloliquefaciens spore production under solid-state fermentation of lignocellulosic residues. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, *10*(4), 755–761.

باتشکراز توجه شما

K.Bagherikia