

Biodegradación del efluente de una industria de resinas fenólicas con hongos de podredumbre blanca-estudio preliminar

Ortega Aguilar Rosa Elena, Muro Urista Claudia Rosario, Díaz Nava María del Carmen,
Illescas Martínez Francisco Javier, Vázquez Rivas Elizabeth

Instituto Tecnológico de Toluca. Avenida Tecnológico s/n. Ex Rancho la Virgen
Metepac, Edo. De México, CP 02200.

reortega@ittoluca.edu.mx

Fecha de aceptación: 20 de julio de 2015

Fecha de publicación: 23 de septiembre de 2015

RESUMEN

El fenol es uno de los contaminantes más peligrosos en los efluentes industriales, nocivo a la salud, aún en bajas concentraciones. Existen muchos métodos convencionales de tratamiento para los residuales fenólicos, sin embargo, presentan el problema de producir efluentes secundarios y subproductos peligrosos. Los procesos biológicos han demostrado ser procesos atractivos y exitosos. Este estudio se realizó para probar la eficiencia de dos hongos macroscópicos *Phanerochaete chrysosporim* y *Corioloopsis polyzona* para la degradación del fenol. Se aplicó un diseño factorial (2^2) con la finalidad de determinar el efecto de la concentración de glucosa y fenol presente en el efluente fenólico (factores) y sus interacciones sobre las variables de respuesta (crecimiento y decoloración). Encontrando que las concentraciones de glucosa y fenol tuvieron efecto sobre el crecimiento y la decoloración, por otro lado, la interacción entre los dos factores tuvieron un efecto significativo para el caso de *Corioloopsis polyzona*.

Palabras clave: biodegradación de fenol, hongos de podredumbre blanca, residuos fenólicos, diseño factorial.

ABSTRACT

Phenol is one of the most hazardous pollutants present in industrial effluent. It is of considerable health concern even at low concentration. There are many conventional methods for the treatment of phenolic wastes. But they suffer from the problem of secondary effluent and hazardous by-products. Biological treatment has proved to be attractive and successful process. The present study was undertaken to test the efficiency of two wild macrofungi *Phanerochaete chrysosporim* and *Corioloopsis polyzona* for the biodegradation of phenol. A complete factorial design (2^2) was made in order to determine the effect of glucose and phenolic effluent concentration (factors) and their interactions influence on the studied response. Glucose and phenol concentration has effect on the reduction of coloration; on the other hand, the interactions between the two factors have significant effects on the decrease of coloration in *Corioloopsis polyzona* case.

Key words: phenol biodegradation, white rot fungi, phenolic waste, factorial design.

INTRODUCCIÓN

El fenol es uno de los contaminantes más peligrosos en los efluentes industriales, son relativamente comunes en desechos de industrias y procesos en la química (detergentes, colorantes, pesticidas, explosivos, producción de resinas, nylon, plastificantes, esmaltes, desinfectantes, biocidas, drogas, aditivos para aceites), petroquímica (refino del petróleo), farmacéutica, galvánica, textil, agroalimentaria (vinícola, oleica), forestal (papel, pulpa), siderúrgica y fotográfica (reveladores), entre otras (El-Ashtoukhy *et al.* 2013; Jayachandran *et al.*, 2008; Marrot *et al.* , 2006; Veeresh *et al.* 2004; Jadhav and Vanjara 2004 . Paula *et al.*, 1998; Bandyopadhyay *et al.*, 1998; Mahadevaswamy *et al.*, 1997). Los compuestos aromáticos como el fenol y sus derivados son sustancias corrosivas y tóxicas, siendo peligrosos para la salud humana y para el ambiente; al introducirse como desechos industriales en los ecosistemas acuáticos afectan adversamente a la biota nativa, incluyendo algas protozoarios, invertebrados e invertebrados (Babich y Davis, 1981) su impacto negativo se ve agravado porque son difíciles de degradar y eliminar, son bioacumulables y recalcitrantes (Annachatre and Gheewala 1996) su concentración puede variar entre uno y varios cientos de miligramos por litro (Moussavi *et al.* 2008). La exposición aguda al fenol causa desórdenes al sistema nervioso central, depresión al miocardio, quemaduras en la piel, pudiendo también causar daño hepático (Wang *et al.* 2011; Annadurai *et al.* 2007; Arutchelvan *et al.*, 2006; Kumar *et al.*, 2005), por sus efectos adversos sobre la biota acuática, el fenol se ha especificado como uno de los 129 compuestos químicos prioritarios, se considera tóxico desde 1977 según el Acta de Enmiendas a la Ley de Agua Limpia y para la cual la agencia Norteamericana de protección al ambiente (EPA) constituye un criterio de calidad del agua (Singh *et al.* 2013; Babich and Davis 1981). A concentraciones tan bajas como 5 mg/L, el fenol imparte al agua un olor típico tras la cloración, mientras que la Organización Mundial de la Salud estableció como concentración máxima permisible 1 mg/L de fenol para agua potable (Saravanan *et al.* 2008).

Con esto, se pone de manifiesto la necesidad de delimitar los niveles máximos emitidos de compuestos fenólicos en efluentes industriales, en función del tipo de cauce donde son vertidos y los usos de los mismos, así como, su eliminación mediante el tratamiento más adecuado. Se han propuesto diversos métodos químicos y físicos de eliminación de fenol como polimerización, oxidación húmeda, ozonización oxidación avanzada, foto-descomposición, electrocoagulación intercambio iónico adsorción extracción y filtración con membranas, con el inconveniente de que muchos de estos son altos consumidores de energía, no económicos o bien producen residuos que degradan el ambiente.

Otra opción de tratamiento son los procesos biológicos con la ventaja la degradación de contaminantes, transformándolos en productos finales simples (Pradeep *et al.* 2011), lo que ha motivado un interés creciente en ellos. Aunque la velocidad y grado de la biodegradación del compuesto químico depende fuertemente tanto de su estructura como de su ambiente (Annachatre y Gheewala 1996). Este tipo de tratamientos pueden clasificarse en microbianos y enzimáticos.

El fenol y compuestos aromáticos pueden ser degradados por varios microorganismos que utilizan al fenol como única fuente de carbono y energía para su crecimiento, entre las bacterias se han descrito trabajos con *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Cyanobacterium*, *Bacillus*, entre los hongos se citan, *Candida*, *Fusarium*, *Graphium*, *Ochromonas*, *Aspergillus*, *Phanerochaete*, *Rhodococcus*, *Rhodotorula*, *Sphigmonas* y *Trichosporon* (Basha *et al.*, 2010). Entre los microorganismos más populares se encuentra *Pseudomonas putida*, así como otras especies bacterianas que degradan el fenol a concentraciones relativamente bajas (Benefield y Clifford, 1980). En contraste con las bacterias, los hongos son capaces de extender la localización de su biomasa a través del crecimiento de sus hifas, son capaces de crecer bajo condiciones ambientales de estrés como disponibilidad baja de nutrientes, baja actividad de agua, y valores bajos de pH, donde el crecimiento bacteriano podría estar limitado. Se ha reportado que las especies *Trichosporon cutaneum*, *Candida*, *Rhodotorula*, *Fusarium flocciferum*, y el hongo de podredumbre blanca (HPB) *Phanerochaete chrysosporium* son capaces de

metabolizar los fenoles (Hofrichter *et al.*, 1992; Anselmo y Novais, 1984; Valli y Gold, 1991; Kennes y Lema, 1994; Lu *et al.*, 2009).

Los basidiomicetos son considerados un grupo muy interesante de hongos, dadas sus capacidades adaptativas excepcionales que les permiten actuar como degradadores naturales de la lignocelulosa, pueden degradar todos los polímeros de la madera, incluyendo la lignina, el uso de los HPB parece promisorio para la remediación de contaminantes que incluyen al fenol y sus compuestos derivados (Brodkorb y Legge, 1992). Se considera posible identificar muchas cepas más de HPB's que sean adecuadas para emplearse como agentes en procesos de biorremediación entre los cientos de especies que aún no han sido examinados a este respecto (Lee *et al.*, 2014).

Dada la problemática que representan los efluentes contaminados con compuestos fenólicos, la finalidad de este trabajo es explorar la capacidad del HPB *Corioloopsis polyzona* para depurar un efluente industrial fenólico, comparando con la presentada por *Phanerochaete chrysosporium*.

METODOLOGÍA

Características del efluente

Se utilizó el efluente de una industria que procesa y emplea resinas fenólicas en el Estado de México, los parámetros de interés fueron la demanda química de oxígeno (DQO), determinado mediante el método de oxidación con dicromato de potasio en reflujo cerrado y valoración volumétrica, descrito en la NMX-AA-030-SCFI-2001, turbiedad con un turbidímetro marca Cole Parmer modelo Vernon Hills, Illinois 60061 NMX-AA-038-SCFI-2001, para conductividad se utilizó un equipo Denver Instrument modelo 250 NMX-AA-093-SCFI-2000, sólidos totales, el pH de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SCFI-2011 y fenoles totales conforme a la NMX-AA-050-SCFI-2001 empleando un espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer modelo Lambda 35.

Microorganismos

Se utilizaron cepas nativas, *Phanerochaete chrysosporium* del estado de Morelos, identificada como HEMIM-5 fue proporcionada por la facultad de Biología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, *Corioloopsis polyzona* fue aislada de la región de la Huasteca Hidalguense (Cruz Ramírez *et al.*, 2012) y proporcionada por la Universidad Politécnica de Pachuca.

Mantenimiento de las cepas

Se prepararon cajas de Petri y tubos de cultivo con medio PDA, esterilizados a 121°C y en condiciones asépticas se depositó un cubo de un cm, se incubaron a 30°C, durante 7 días posteriormente se conservaron a 4°C hasta su uso, los tubos se sembraron cada tres meses y las cajas cada semana, para los ensayos se utilizaron cajas con no más de 7 días de resiembra.

Condiciones de cultivo

Se diseñó un experimento factorial 2², donde los factores considerados fueron concentración de fenol y concentración de glucosa para cada una de las cepas probadas, se trabajó en medio sólido, la composición básica consistió de agar-agar 17 g/L, almidón de papa 20 g/L, tartrato de amonio 15 mM, lactato de sodio 20 mM, MnSO₄ 40 mg/L, rojo 2 100 mg/L, para los factores probados, la concentración de glucosa fue de 0 y 10 g/L, efluente fenólico para concentraciones en el medio de 930 y 1550 mg/L, según correspondiera.

En condiciones asépticas las cajas se inocularon depositando en el centro un cubo de 1 cm del cultivo correspondiente con 7 días de resiembra como máximo, se incubaron a 30°C, realizando mediciones diarias del diámetro de crecimiento de hongo.

Como control se sembraron cada hongo en cajas con medio PDA y 100 mg/L de rojo fenol, se incluyeron además los blancos correspondientes sin el inóculo, las pruebas fueron realizadas por triplicado.

Prueba de decoloración

Se utilizó la decoloración del colorante rojo 2 como método de selección para determinar si el hongo de podredumbre blanca fue capaz de degradar el fenol ya que ha sido reportada una relación entre la actividad ligninolítica y la decoloración, para esta técnica se midió diariamente el halo de decoloración obtenido en cada una de las cajas sembradas e incubadas a 30°C.

Análisis de datos

Para el análisis de los datos de crecimiento y decoloración se utilizó el programa Excel, se aplicó análisis de variancia (ANOVA) para un diseño factorial 2², a un nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del efluente

Durante el periodo de este estudio se colectaron cuatro muestras, con frecuencia mensual, al determinar las características mencionadas en la metodología se observó gran variabilidad entre ellas, los valores máximos y mínimos encontrados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos para las propiedades del efluente fenólico

Parámetro	Unidades	Valor máximo	Valor mínimo
Fenoles			
Método colorimétrico			
Absorción a 254 nm	mg/L	35574	1007
DQO	mg/L	34060	1016
Turbiedad	NTU	35555	980
Conductividad	μS/cm	752	51.6
Sólidos totales	mg/L	1888	69.54
pH	unidades	0.367	0.005
		6.9	4.04

De los valores presentados se observa que los parámetros prioritarios resultan ser la concentración de fenoles y DQO, como era de esperarse al aumentar la concentración de fenoles la DQO también lo hace, por lo que es necesario aplicar un proceso adecuado de remoción del fenol para que este efluente pueda ser dispuesto adecuadamente o en su caso reutilizado en el proceso.

Efecto de la concentración de glucosa y fenol

Para evaluar el proceso de decoloración del rojo 2 empleado como indicativo de actividad ligninolítica se realizó un diseño factorial donde la concentración de glucosa y fenol se consideraron los factores principales, en la tabla 2 se presentan los niveles considerados.

Las variables de respuesta fueron la velocidad de crecimiento y velocidad de decoloración, obtenidas como la razón entre el diámetro en centímetros y el tiempo en días requerido por los hongos para

alcanzarlo, para facilitar el manejo en los datos los valores se presentan codificados, lo que consiste simplemente en multiplicar la mencionada razón por 10^2 .

Tabla 1. Valores asignados a los niveles para los factores en el diseño 2^2

Factores	Nivel bajo	Nivel alto
	-	+
Concentración de glucosa (g/L) X_1	0	10
Concentración de fenol (mg/L) X_2	930	1550

Las combinaciones correspondientes para cada corrida y los niveles correspondientes son los mostrados en la tabla 2

Tabla 2. Combinación de los niveles para los factores en el diseño 2^2

Número de experimento	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Para *Corioloipsis polyzona* la gráfica de la figura 1 presenta los resultados codificados de los efectos producidos al variar las concentraciones de glucosa y fenol sobre la velocidad de crecimiento, se observa que para las condiciones estudiadas no existe interacción entre los factores, siendo el efecto de la glucosa positivo ya que se registra aumento en la velocidad de crecimiento al incrementarse la concentración de glucosa, este efecto es muy marcado cuando la concentración de fenol se encuentra en el nivel alto siendo más pequeño cuando se trata del nivel bajo de fenol, observando que cierta tendencia a presentar interacción entre ambos factores para niveles superiores en la concentración.

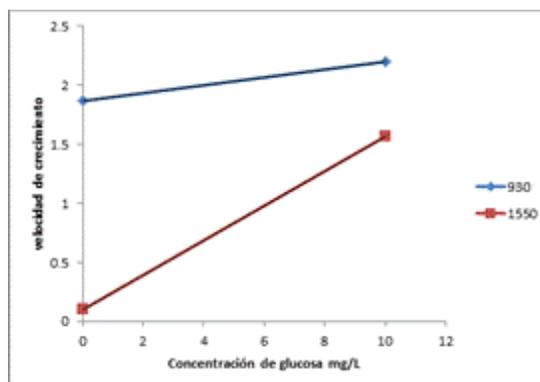


Figura 1. Efecto de la variación en concentración de glucosa y fenol para el crecimiento de *Corioloipsis polyzona*.

El comportamiento es diferente para la velocidad de decoloración como se observa en la figura 2, manifestándose claramente en este caso la interacción entre los factores, encontrando que los efectos son negativos tanto para la interacción como los factores principales.

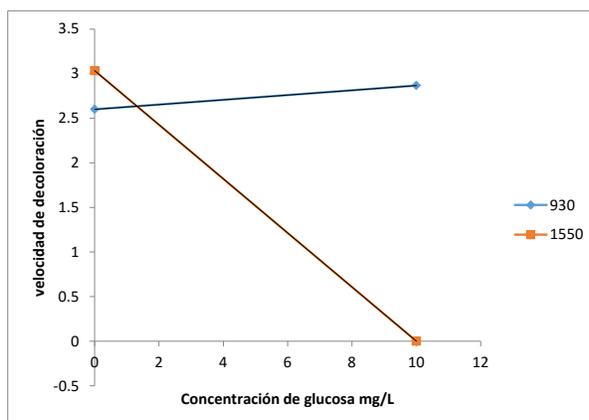


Figura 2. Efecto de la variación en concentración de glucosa y fenol para la decoloración producida por *Coriopsis polizona*.

De acuerdo con lo anterior el comportamiento para la producción de biomasa es diferente al que presenta la decoloración y producción de enzimas ligninolíticas lo que está de acuerdo con lo demostrado por Jaouani *et. al.* (2006, 2003) para la decoloración del agua residual generada en la producción de aceite de olivo, debida a compuestos fenólicos.

Para el caso de *P. chrysosporium* los efectos producidos por la variación de ambas variables son mayores a los presentados por *C. polizona*, siendo más evidente para el crecimiento, lo que se observa al comparar las figuras 1 y 2 con 3 y 4 respectivamente.

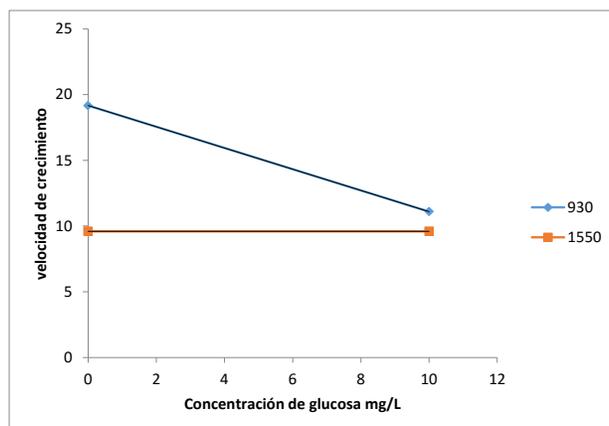


Figura 3. Efecto de la variación en concentración de glucosa y fenol para el crecimiento de *Phanerochaete chrysosporium*.

Lo anterior se explica por las diferencias en las características propias de cada cepa ya que para los controles empleados, donde el medio utilizado consistió en PDA y colorante, la velocidad de crecimiento del *P. chrysosporium* fue dos veces la de *C. polizona*, mientras que la que corresponde a la decoloración fue el triple, lo que coincide con lo mostrado por Sayadi y Ellouz (1993), donde entre varios hongos de podredumbre blanca probados, *P. chrysosporium* mostró el potencial más alto de descontaminación de las aguas residuales producidas en la obtención de aceite de olivo.

Con respecto al comportamiento de la velocidad de crecimiento, la gráfica de la figura 3 muestra que para estas condiciones no se encuentra interacción entre los factores, siendo la tendencia a manifestarse a concentraciones mayores. Se observa además que la concentración de fenol tiene el

mayor efecto siendo notoria la disminución en la variable al aumentar el nivel de glucosa para el nivel bajo de fenol, contrario a la respuesta presentada en el nivel alto de fenol, donde se mantiene prácticamente invariable.

El comportamiento encontrado para la velocidad de decoloración fue semejante al descrito, sólo que positivo, ya que al incrementarse la concentración de glucosa también lo hizo la variable de respuesta para el nivel bajo de concentración de fenol, siendo invariable para el nivel alto de fenol, según se observa en la gráfica de la figura 4.

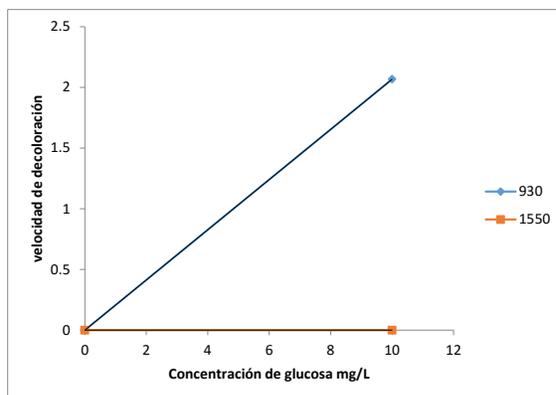


Figura 4. Efecto de la variación en concentración de glucosa y fenol para la decoloración producida por *Phanerochaete chrysosporium*.

Se consideró la capacidad de decoloración como indicativo de la producción de enzimas ligninolíticas y como reflejo del potencial de degradación de los compuestos fenólicos presentes en el efluente estudiado. En este caso se encontraron respuestas diferentes para *C. polyzona* y *P. chrysosporium* con la variación de los factores, lo que puede asociarse a patrones de comportamiento distintos para estos hongos, de acuerdo a lo descrito por Jaouani *et. al.* (2003) quienes mostraron diferencias en el patrón de producción de enzimas para varias cepas de hongos de podredumbre blanca que sugieren que el desteñido de colorantes se asegura por varios mecanismos, además demostraron para *C. polyzona* que una decoloración exitosa estuvo asociada con la degradación de compuestos aromáticos tanto de pesos moleculares altos, como bajos, indicando la posible despolimerización de polifenoles y la degradación de compuestos fenólicos de pesos moleculares bajos.

CONCLUSIONES

Se comprobó que *Phanerochaete chrysosporium* es capaz de crecer en el efluente fenólico, con un efecto importante en la velocidad de crecimiento debido a la variación en la concentración de glucosa, sin interacción entre los factores, *Coriopsis polyzona* mostró una fuerte interacción entre la concentración de glucosa y la del efluente fenólico, la velocidad de decoloración mostrada por *P. chrysosporium* fue mayor a la de *C. polyzona*, por lo que ambos resultarían viables para la depuración, sin embargo se considera conveniente continuar los estudios con este último, debido a que la eficiencia del tratamiento biológico puede mejorarse mediante la selección cuidadosa de las condiciones del proceso que influyen la decoloración y producción de enzimas, entre las que se encuentran el medio de cultivo.

REFERENCIAS

- Annachhatre A.P. and Gheewala S.H. (1996). Biodegradation of chlorinated phenolic compounds. *Biotechnology Advances*, 14: 35-56.
- Annadurai G., Ling L.Y. and Lee J.F, (2007). Biodegradation of phenol by *Pseudomonas pictorum* immobilized with chitin, *Afr. J. Biotechnol.*, 6: 296- 303.
- Anselmo, A.M. & Novais, J.M. (1984). Isolation and selection of phenol degrading microorganisms from an industrial effluent. *Biotechnol. lett.*, 9: 601-606.
- Arutchelvan V., Kanakasabai V., Elangovan R., Nagarajan S. and Muralikrishnan V., (2006). Kinetics of high strength phenol degradation using *Bacillus brevis*, *J. Haz. Mat.*, 129: 216–222.
- Babich H, Davis DL (1981) Phenol: a review of environmental and health risks. *Regul Toxicol Pharmacol* 1: 90–109.
- Bandyopadhyay, K., Das, D. & Maiti, B.R. (1998). Kinetics of phenol degradation using *Pseudomonas putida* MTCC 1194. *Bioprocess eng.*, 18: 373-377.
- Basha K. M., Rajendran A, and Thangavelu V. (2010). Recent advances in the Biodegradation of Phenol. *Asian J. Exp. Biol. Sci.*, 2: 219-234.
- Berfield, L.D. & Randall, CW. (1980). Biological process Design for waste water treatment. Prentice Hall, New Jersey.
- Brodkorb T. S. and Legge R. L. (1992). Enhanced biodegradation of phenanthrene in oil tar-contaminated soils supplemented with *Phanerochaete chrysosporium*. *Applied. Environ. Microbiol.*, 58: 3117-3121
- Cruz-Ramírez M.G., Rivera-Ríos J.M., Téllez-Jurado A, Maqueda Gálvez A.P., Mercado-Flores Y., Arana-Cuenca A. (2012). Screening for thermotolerant ligninolytic fungi with laccase, lipase, and protease activity isolated in Mexico. *Journal of Environmental Management* 95: S256-S259
- El-Ashtoukhy E-S.Z., El-Taweel Y.A., Abdelwahab O., Nassef E.M..(2013). Treatment of Petrochemical Wastewater Containing Phenolic Compounds by Electrocoagulation Using a Fixed Bed Electrochemical Reactor. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 1534 - 1550
- Hofrichter M., Gunther T. & Fritsche W. (1992). Metabolism of phenol, chloro- and nitrophenols by the *Penicillium* strain Bi 7/2 isolated from a contaminated soil. *Biodegradation*, 3: 415-421
- Jadhav DN, Vanjara AK (2004) Removal of phenol from wastewater using sawdust, polymerized sawdust and sawdust carbon. *Indian J Chem Technol* 11: 35–41.
- Jaouani, A., Sayadi, S., Vanthournhout, M., Pennickx, M.J., 2003. Potent fungi for decolourisation of olive oil mill wastewaters. *Enz. Microb. Technol.* 33, 802–809.
- Jaouani A., Tabka M. G., Penninckx M. J. (2006). Lignin modifying enzymes of *Coriopsis polyzona* and their role in olive oil mill wastewaters decolourisation. *Chemosphere* 62: 1421–1430.
- Jayachandran V.P. and Kunhi A.A.M. (2008). Degradation of 3-chlorobenzoate and phenol singly and in mixture by a mixed culture of two orthopathway following *Pseudomonas* strains, *J. Indust. Micro.Biotech.*, 36: 219-27.
- Kennes, C. & Lema, J.M. (1994). Simultaneous biodegradation of p-cresol and phenol by the basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *J. Ind. Microbiol.*, 13: 311-314.
- Kumar A., Kumar S. and Kumar S., (2007). Biodegradation kinetics of phenol and catechol using *Pseudomonas putida* MTCC 1194, *Biochem. Engin. J.*, 22 (2), 151–159, (2005).

- Lee Y. M., Kim G., Kim J. (2014). Biotechnological procedures to select white rot fungi for the degradation of PAHs. *Journal of Microbiological Methods* 97: 56–62
- Lu Y., Yan L., Wang Y., Zhou S., Fu J. & Zhang J. (2009). Biodegradation of phenolic compounds from coking waste water by immobilized white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *J.Hazard. Mater.*, 165: 1091-1097.
- Mahadevaswamy M., Mall I. D., Prasad B. and Mishra I. M., (1997). Removal of phenol by adsorption on coal fly ash and activated carbon, *Pollut. Res.*, 16: 170-175.
- Marrot B., Barrios -Martinez A., Mou P. and Roche N., (2006). Biodegradation of high phenol concentration by activated sludge in an immersed membrane bioreactor, *Biochem. Eng. J.*, 30: 174-183.
- Moussavi G, Mahmoudi M, Barikbin B (2008) Biological removal of phenol from strong wastewaters using a novel MSBR. *Water Res.* 43: 1295–1302.
- Paula M., Van Schei. and Young L.Y., (1998). Isolation and characterization of phenol degrading denitrifying bacteria, *Appl. Environ. Microbiology*, 64: 2432-2438.
- Pradeep NV, Anupama, Hampannavar US (2011) Biodegradation of phenol using rotating biological contactor. *Int J Environ Sci* 2: 105–113.
- Saravanan P, Pakshirajan K, Saha P (2008) Growth kinetics of an indigenous mixed microbial consortium during phenol degradation in a batch reactor. *Bioresour Technol* 99: 205–209.
- Sayadi S, Ellouz R. (1993). Screening of white rot fungi for the treatment of olive mill waste-waters. *J Chem Technol Biotechnol*; 57: 141–146.
- Singh A, Kumar V, Srivastava JN (2013) Assessment of bioremediation of oil and phenol contents in refinery waste water via bacterial consortium. *Pet Environ Biotechnol* 4: 1-4.
- Valli, K. & Gold, M.H. (1991). Degradation of 2, 4-dichlorophenol by the lignin-degrading fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *J. Bacteriol.*, 173: 345-352.
- Veeresh GS, Kumar P, Mehrotra I (2004) Treatment of phenol and cresols in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) process: a review. *Water Res.* 39: 154-170.
- Wang Y, Song J, Zhao W et al (2011) In situ degradation of phenol and promotion of plant growth in contaminated environments by a single *Pseudomonas aeruginosa* strain. *J Hazard Mater* 192: 354-360.