

INTERCAMBIO IÓNICO

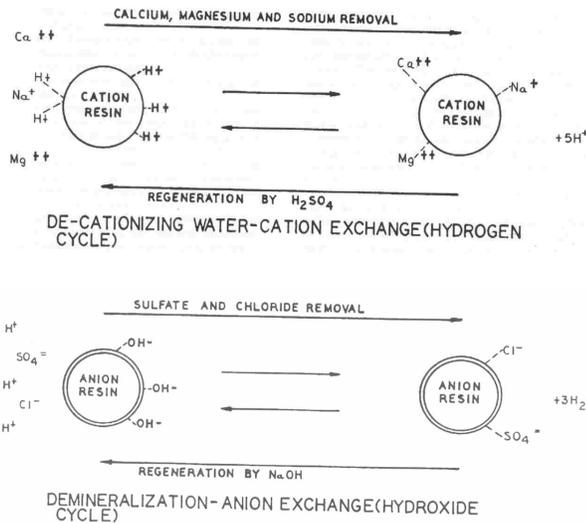
Introducción.-

En esencia, el proceso de cambio de ión consiste en sustituir en una disolución uno o varios de sus iones por otros que forman parte del agente ión-cambiador; la primera cede sus iones a éste, y el ión cambiador, a su vez, cede los suyos, en cantidad equivalente, a la disolución. Si los iones cedidos por el ión-cambiador son H^+ y OH^- , y si el vehículo disolvente es el agua, el proceso particular que entonces tiene lugar es una desalinización del agua, resultando un producto muy semejante al agua destilada.

El fenómeno se conoce de antiguo, aunque no se le dio categoría de operación básica con características propias. Lo utilizó Scheele para preparar sosa (cambio de OH^- por Cl^- al reaccionar el $ClNa$). Way y Thomson identificaron el fenómeno en las transformaciones que sufren los abonos amoniacales. Desde principio del siglo IXX se utilizó este fenómeno para el ablandamiento de aguas mediante las zeolitas naturales o artificiales (permutitas) El empleo de las zeolitas presenta algunas dificultades: su capacidad de cambio no es grande, y sólo pueden trabajar a valores del pH muy próximos a la neutralidad. Por eso fue sensacional el aporte de Adams y Holmes, en 1935, al obtener un nuevo tipo de sustancias ión-cambiadoras, de tipo resínico, sintéticas (condensación de ácidos fenolsulfónicos con formol, parecidas, pues, a las baquelitas) que resisten medios muy variados y que eliminan iones salinos cediendo por su parte iones H^+ y OH^- , es decir, agua. Poco después se obtuvieron como intercambiadores los carbonos sulfonados y otras sustancias sintéticas, que hoy se emplean ampliamente y que describimos más adelante en este apunte.

Mecanismo del intercambio iónico.-

No se trata de un simple paso de iones, unos en un sentido y otros en el contrario, a través de la superficie del sólido cambiador, sino que el proceso se inicia por una adsorción a la que sigue una reacción química.

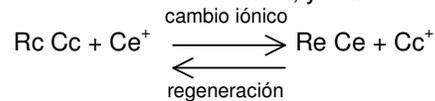


Al ponerse en contacto el electrolito con el intercambiador de iones, los iones de aquél se orientan hacia la cara límite (superficie del sólido cambiador de ión), circunstancia que puede apreciarse por la variación de resistencia eléctrica que experimenta la disolución iónica. Dichos iones, venciendo la resistencia a la difusión, se adsorben y luego se fijan químicamente sobre el intercambiador, el cual libera otros que a partir de este momento han de recorrer el camino inverso al de los iones sustituyentes. La aparición en la disolución de los iones de sustitución liberados por el intercambiador, vuelve a determinar una variación de la conductividad de la disolución iónica.

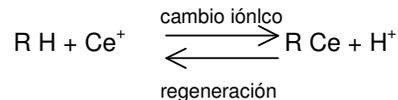
Al proceso de adsorción le acompaña la aparición de una presión en la capa monomolecular - monoiónica- que Austerweil ha valorado en 13 atm. para un cambiador saturado de Ca^{++} frente a disolución sulfúrica al 1,5 %. En principio, no parece que un intercambiador usado y saturado de iones Ca^{++} pudiera ser regenerable por el ácido sulfúrico, pues la acción de regeneración

conduciría a $\text{SO}_2\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ muy poco soluble, que bloquearía la superficie del ión-cambiador. Sin embargo, la regeneración es posible en la práctica, ya que la citada presión existente en la interfase favorece la formación del semihidrato del sulfato cálcico (densidad = 2,71) y no la del dihidrato (densidad = 2,13), y como aquél es unas seis veces más soluble que éste, resulta relativamente fácil de eliminar de la superficie del intercambiador de iones, permitiendo que continúe el fenómeno hasta la regeneración total de aquél. A pesar de esto, el proceso resulta muy lento para las necesidades industriales; por lo cual, la regeneración de los cambiadores de ion saturados de iones calcio, se efectúa lavándolos con disolución de CaNa , para sustituir los iones Ca^{++} por iones Na^+ , y luego desplazar éstos por los iones H^+ del SO_4H_2 diluido, si procede. Para el proceso de adsorción, que es, repetimos, la fase previa del intercambio, se ha aplicado la ecuación de la isoterma de Freundlich. Otros autores han aplicado al proceso la ecuación de Langmuir .

Como la reacción de intercambio es reversible, se puede aplicar la ley de masas. La reacción directa es la propia reacción de intercambio, y la inversa será la de regeneración:



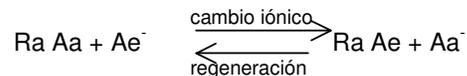
En la que se representa el intercambio de cationes, Ce^+ , de un electrolito por los cationes Cc del cambiador. Rc representa el resto de la molécula del intercambiador de iones. El catión Cc^+ que puede ceder el cambiador de catión suele ser sodio (forma sódica del catión-cambiador) o el hidrógeno (forma ácida). En este segundo caso, la ecuación adopta esta expresión:



La cual nos dice que, en este caso, la solución de la que se sustraen iones indeseables se acidifica. La ley de masas nos permite prever la influencia del pH en el proceso. Esta acidez se puede eliminar posteriormente haciendo pasar la disolución por un anión-cambiador, que reteniendo el anión parejo del H^+ dé a la disolución iones OH^- en cantidad equivalente; es evidente que entonces la disolución queda neutra y desalificada.

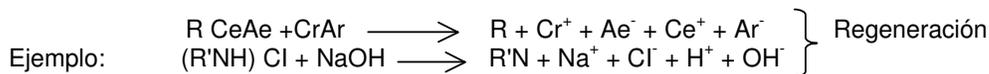
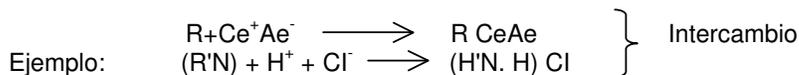
Para el caso del cambio de aniones hay dos teorías que se disputan la explicación química del fenómeno, que son:

1) Que el intercambio de anión se produce igual que hemos visto para el cambio de catión:



En la cual Ra es el radical de la molécula de cambiador de anión, Aa^- es el anión que puede ceder aquél (OH^- en muchos casos), y Ae^- es el anión contenido inicialmente en el electrolito. También en este caso es aplicable en toda su extensión y con todas sus consecuencias la ley de masas.

2) Que el intercambiador de aniones efectúa una adsorción total de las moléculas de que consta el electrolito, es decir, de las parejas de iones correspondientes:



donde R' es un radical orgánico del cambiador de anión, y Cr y Ar son el catión y el anión que componen el regenerante.

Regeneración de intercambiadores de iones.-

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, la regeneración de un intercambiador de catión agotado se obtendrá tratándolo por disoluciones del catión propio del cambiador de catión en cuestión:

Cc^+ para los de forma salina, o H^+ para los de forma ácida. En este último caso se suele emplear disolución diluída de CaH o, mejor, de SO_4H_2 , que es más barato.

Las formas salinas suelen regenerarse con disolución de $CaNa$, pues la forma sódica es la más frecuente.

Los intercambiadores de anión se regeneran con disoluciones de $NaOH$ o, mejor, de CO_3Na_2 , que es más económico. En este caso se libera $CO_3H_2 = H_2O + CO_2$; por lo que corrientemente se emplea un dispositivo adecuado de desgasificación de los líquidos resultantes. Otras veces se emplea disolución de NH_4OH .

En todo caso, las disoluciones regeneradoras nunca pueden ser concentradas para evitar reacciones secundarias con los iones intercambiadores, pues éstos se hinchan disminuyendo la permeabilidad del lecho y perdiendo, además, actividad.

Forma de efectuar la regeneración.-

Hay que tener presente que por regeneración no se llegará nunca, en la práctica, al intercambiador de iones puro. Vemos en la ecuaciones anteriores que para que fuera completa de izquierda a derecha - o sea, en el sentido de la regeneración - se necesitarán concentraciones ilimitadas de catión regenerante, Cc^+ , y que éste actuara durante larguísimo tiempo, cosas industrialmente imposibles. De aquí que para valorar prácticamente la capacidad de intercambio de cualquier cambiador no deba procederse con productos puros, sino con productos que han sido agotados por lo menos una vez, y que después se han regenerado en condiciones semejantes a las que hayan de utilizarse en la práctica industrial.

Ejecución industrial del proceso.-

El intercambio iónico se suele efectuar industrialmente por percolación en columnas cargadas con lechos granulares. Los aparatos y el consumo de cambiador se calculan de manera muy parecida a como hemos visto en la Adsorción. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que desde ese punto de vista, los intercambiadores actúan siempre como adsorbentes lentos, cosa fácil de explicar si se tiene en cuenta que además de la adsorción el fenómeno implica reacciones químicas, difusión en fase líquida y difusión a través del cambiador sólido, proceso éste muy lento. Como norma general, el tiempo de contacto para alcanzar el equilibrio es siempre largo; hay veces que aun con tiempos prolongados no se llega al equilibrio.

Entre las aplicaciones industriales de este proceso, que son , numerosas podemos citar:

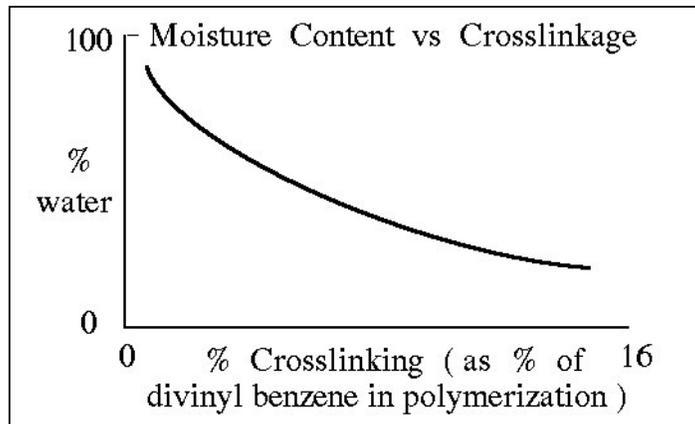
El ablandamiento de aguas industriales y domésticas, desionizados, recuperación, purificación y preparación de productos químicos, preparación y separación de sustancias bioquímicas.-

El intercambio de iones es un proceso que incluye dos usos muy similares de la misma tecnología. El primero es el ablandar de agua. Éste es el proceso de quitar iones del agua y de substituirlos por los iones del sodio y los iones del cloruro. El uso más común para esto es residencial, donde un dueño de una casa está intentando reducir la dureza o mejorar el gusto del agua que el servicio municipal proporciona. Esto también reduce los depósitos y la incrustación que se pueden dejar del agua con un alto nivel de la dureza. El segundo uso es desionización. En la desionización, la dureza y otros iones que están inicialmente en el agua se quitan y se substituyen por los iones de H^+ y del OH^- , que pueden combinar para formar el agua. Esto se utiliza en los usos donde se requiere el agua extremadamente pura. El proceso trabaja como sigue: Las resinas del intercambio de iones (pequeños granos que están cargados) están cubiertas con los iones del reemplazo. En el caso de ablandar de agua los granos están cubiertos con Na^+ y el Cl^- . en el caso de la desionización, están cubiertos con H^+ y el OH^- . Fluyendo el agua sobre la resina. Los iones en el agua son atraídos a la resina. Los iones del agua se fijan ellos mismos a la resina, y reemplazan a los iones originales de la resina. La resina se agota cuando se van todos los iones del reemplazo. Para llenar la resina, también llamada "regeneración de la resina", una solución fuerte de los iones del relleno se debe aplicar a la resina. Esto quita los iones que vinieron del agua y regeneró la resina. La solución que se utiliza para regenerar los suavizadores de agua es salmuera llamada concentrada del agua salada. Hay dos soluciones que se utilizan para regenerar un desionizador. Uno es un ácido concentrado, y la otra es una base concentrada.

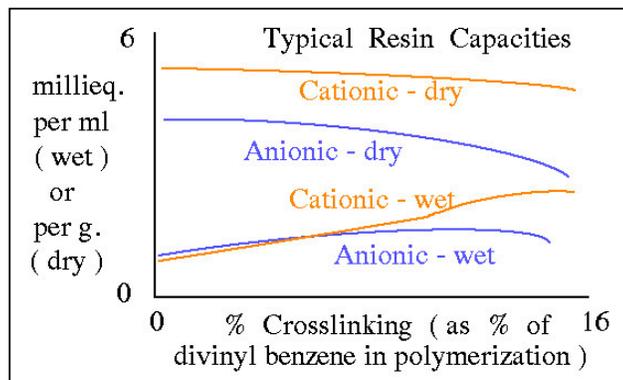
Las características de las resinas del intercambio de iones

Reticulado: La cantidad de eslabones de la reticulación depende de las proporciones de diversos monómeros usados en el paso de la polimerización. Las gamas prácticas son 4 % a 16 %. Las resinas con muy baja reticulación tienden a ser acuosas y a un cambio marcado de sus dimensiones dependiendo de qué iones están limitados.

Las características que se correlacionan con la reticulación son: (a) Una propiedad física que cambia con los cambios en el reticulado es el contenido de agua de las resinas de intercambio de iones. Por ejemplo los grupos del ácido sulfónico atraen el agua, y esta agua es tenazmente retenida dentro de cada partícula de la resina. Los grupos del amonio cuaternario de las resinas aniónicas se comportan de una manera similar. La figura demuestra un diagrama del cambio del contenido de agua con los cambios en eslabón.



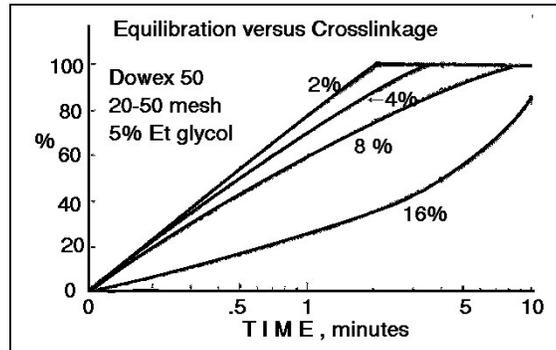
La capacidad total de una resina de intercambio de iones se define como el número total de los equivalentes químicos disponibles para el intercambio por un cierto peso de unidad o del volumen de unidad de resina. La capacidad se puede expresar en términos de equivalentes por el gramo seco de resina o en términos de miliequivalentes por el gramo seco de resina o en términos de miliequivalentes por mililitro de resina mojada. Cuanto más altamente reticulado sea una resina, más difícil se convierte el introducir a grupos funcionales adicionales. Se realiza la sulfonación después de que se ha terminado la reticulación y los grupos del ácido sulfónico se introducen dentro de la partícula de la resina así como sobre su superficie. Asimismo, se introducen los grupos de amonio cuaternario después de que se haya terminado la polimerización y son también ambos introducidos al interior la partícula así como en su superficie. Pocos grupos funcionales pueden ser introducidos dentro de las partículas cuando los reticulan altamente y por lo tanto la capacidad total en base seca cae levemente. Se invierte esta situación cuando el volumen en base húmeda se utiliza para medir la capacidad en una resina. Aunque se introducen unos pocos grupos funcionales en una resina altamente reticulada, estos grupos se espacian más cerca juntos sobre una base del volumen porque el volumen de agua es reducido por la reticulación adicional. (véase sobre figura). Así la capacidad sobre una base húmeda del volumen aumenta mientras la reticulación aumenta. La figura siguiente describe los cambios en capacidad mientras que se cambia la reticulación.



Velocidad de Equilibrio

Las reacciones del intercambio de iones son reacciones reversibles dependiendo de las condiciones del equilibrio que son diferentes para diversos iones. El entrecruzamiento tiene una

influencia definida en el tiempo requerido para que un ión alcance el equilibrio. Una resina del intercambio de ion que se reticula altamente es absolutamente resistente a la difusión de varios iones a través de ella y por lo tanto, el tiempo requerido para alcanzar equilibrio es mucho más largo. La figura inferior ilustra el efecto del reticulado sobre el tiempo requerido para el etilenglicol alcance el equilibrio. En general, cuanto más grande es el ion o la molécula que difunde en una partícula del intercambio de iones, o más altamente reticulada el polímero, el más largo será el tiempo requerido para alcanzar condiciones del equilibrio.



Resumen de los efectos del Reticulado

Los copolímeros del estireno que contienen cantidades bajas de divinylbenzeno (1 - 4%) se caracterizan como sigue:

- 1) Alto grado de permeabilidad.
- 2) Contenga una cantidad grande de humedad.
- 3) Las capacidades son más bajas sobre una base mojada del volumen.
- 4) Las velocidades para alcanzar el equilibrio son altas.
- 5) Se reduce la estabilidad física.
- 6) La selectividad para varios iones se disminuye, pero se aumenta la capacidad de acomodar iones más grandes.

Copolímeros del estireno que contienen altas cantidades de divinylbenzeno (12 - 16%) exhiben características en la dirección opuesta.

Tamaño de partícula

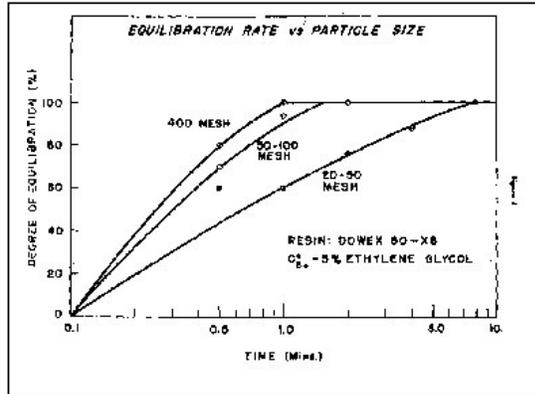
El tamaño físico de las partículas de la resina es controlado durante el proceso de la polimerización. La malla se utiliza para tamizar resinas para conseguir una gama bastante uniforme de tamaños. Los tamaños de malla en la tabla siguiente se refieren a los tamices estándar de ESTADOS UNIDOS. Un número más alto de tamaño de malla significa más y más alambres finos por unidad de área y así una abertura más pequeña.

Rango de Tamaños de Malla	Diámetro de las Partículas	
	Pulgadas	Micrómetros
20 - 50	0,0331-0,0117	840-297
50 - 100	0,0117-0,0059	297-149
100 - 200	0,0059-0,0029	149-74
200 - 400	0,0029-0,0015	74-38
> 400	< 0,0015	< 38

(a) Velocidad de equilibrio

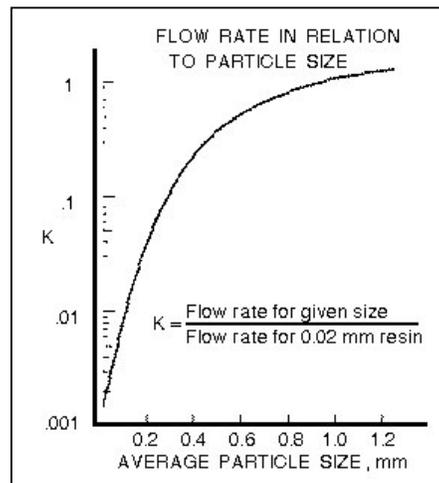
El tamaño de partícula de una resina de intercambio de iones influencia el tiempo requerido para establecer condiciones del equilibrio. Hay dos tipos de difusión que se deben considerar en un equilibrio de intercambio de iones. La primera se llama difusión de la película o movimiento de iones de una solución circundante a la superficie de una partícula de intercambio de iones. El segundo se llama difusión interna y es el movimiento de iones de la superficie al interior de una partícula de intercambio de iones. La difusión de la película es generalmente la

reacción que controla en soluciones diluidas mientras que la difusión interna está controlando en soluciones más concentradas. El tamaño de partícula de una resina de intercambio de iones afecta la difusión de la película y la difusión interna. Una partícula de malla fina presenta más área superficial para la difusión de la película y también contiene menos volumen interno a través de el cual un ion deba difundir. Una disminución de tamaño de partícula acorta así el tiempo requerido para el equilibrio. El cuadro siguiente ilustra el acortamiento de los tiempos del equilibrio para las disminuciones de tamaños de partícula.



(b) Velocidad de Flujo

Los procesos de intercambio ionico se realizan generalmente en columnas con la resina estacionada sobre un soporte conveniente. Los líquidos pueden ser procesado hacia arriba o hacia abajo fluyendo a través de tales columnas. Las partículas esféricas de la resina de intercambio de iones resisten el fluir de un líquido a través o alrededor de ellos. Cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, mayor será esta resistencia contra la cual un líquido debe fluir. Esta resistencia se eleva muy rápidamente cuando se emplean tamaños de partículas de número 100 o más pequeño. La figura ilustra la disminución de caudales cuando los tamaños de partícula disminuyen.



Resumen: Esta parte del apunte describe el proceso de fabricación y los polímeros involucrados. y discute la importancia del entrecruce de divinilbenzeno (DVB) de la estructura de la resina. Las diferentes estructuras físicas, gelatinosas y macroporosas, son comparadas, al igual que las dos estructuras químicas, acrílica y estirénica. También se ilustra la selectividad y la cinética de los distintos tipos de sitios de intercambio. Nos centramos en estos polímeros por ser los de última tecnología desarrollados por las principales compañías fabricantes de resinas de intercambio iónico.-

Introducción

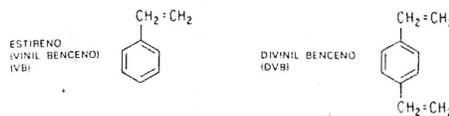
Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción, generación de vapor, y manufactura. Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva; calcio y magnesio -cationes que generan dureza, los cuales hacen que el agua sea "dura"- y sodio. Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro, y silicio.

Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para grandes como pequeñas instalaciones, por ejemplo, desde suavizadores de agua para el hogar hasta grandes instalaciones de servicios.

Síntesis

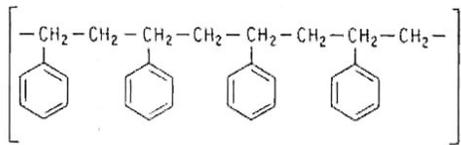
La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB).

{1} MONÓMEROS BÁSICOS

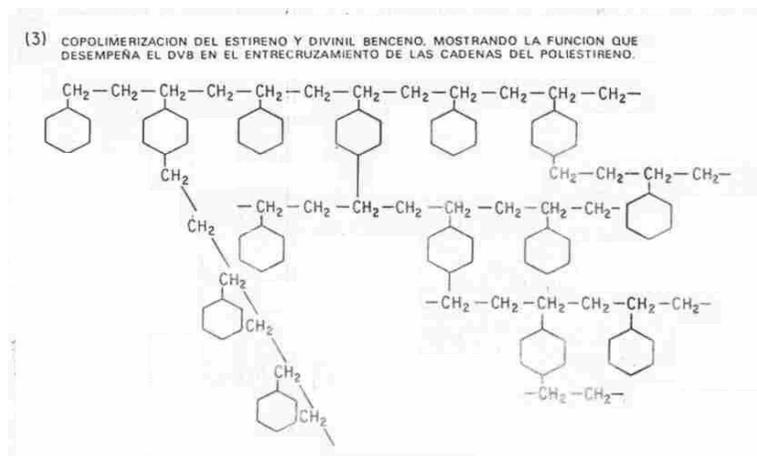


El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de más o menos un milímetro. En ese momento inicia la reacción de polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno/DVB formen las esferas pequeñas de plástico que resultan. El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua.

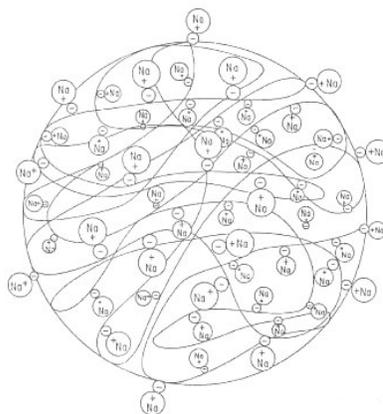
{2} POLIMERIZACIÓN DEL ESTIRENO EN POLIESTIRENO



La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activada para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera. Cada grupo activo posee una carga eléctrica fija, la cual es balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, los cuales tienen la libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga. Las resinas catiónicas fuertes se forman tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónico-ácidos permanentes, de carga negativa, a través de las esferas.



Aquí es importante el hecho de que los sitios de intercambio formados de tal manera se encuentran ubicados a través de la esfera. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99% de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.



Las resinas aniónicas fuertes se activan en un proceso de dos pasos que consiste en la clorometilación seguida de la aminación. Este proceso de dos pasos comienza con el mismo material de estireno/DVB que se usa para las resinas catiónicas. La única diferencia es que la cantidad de DVB que se utiliza es menor para permitir una esfera más porosa. El primer paso de la reacción es la ligación de un grupo de clorometilo a cada uno de los anillos de benceno en la estructura de la esfera. Este material plástico intermedio clorometilado debe reaccionar con una amina en un proceso conocido como aminación. El tipo de amina utilizada determina la funcionalidad de la resina. Una amina comúnmente utilizada es la trimetilamina (TMA), que crea un intercambiador aniónico fuertemente básico de Tipo 1. El uso de dimetiletanolamina (DMEA) producirá una resina aniónica de Tipo 2.

Estructura física y química de las resinas

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño de la esfera, y su resistencia a las fracturas. La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento. Las esferas deberán tener dimensiones uniformes con un tamaño normal que varía entre 16 y 50 "US Mesh" (tamaño estadounidense de malla). El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y la regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera. Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosas son polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. Éstas tienen sitios de intercambio distribuidos de

manera pareja a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de DVB que se utiliza en la síntesis de una esfera determina su fortaleza relativa. La resina catiónica de ácido fuerte que se usa para la suavización, la cual es el medio más común de intercambio iónico, consiste casi siempre de un material gelatinoso de 8% DVB. Se ha comprobado que la cantidad de DVB que contiene esta resina es la más económica en términos de precio de la resina y duración esperada de funcionamiento. Actualmente se encuentran disponibles resinas con un contenido de DVB entre 2% y 20% y aún más. Un mayor contenido de DVB le da aun más fortaleza a la resina, pero el entrecruzamiento adicional puede obstruir la cinética, haciendo que la esfera sea demasiado resistente a la contracción e hinchamiento que son necesarios durante el funcionamiento normal. Las resinas macroporosas fueron introducidas comercialmente en 1959 y están hechas con grandes poros que permiten el acceso a sitios interiores de intercambio. También se conocen como resinas macroreticulares o de poros fijos. Las resinas macroporosas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de la esfera. Esta estructura con apariencia esponjosa permite que la porción activa de la esfera contenga un nivel elevado de entrecruzamiento de DVB sin afectar la cinética del intercambio. Desafortunadamente, también significa que la resina tiene una menor capacidad porque las esferas contienen menos sitios de intercambio. Los "poros" pueden ocupar entre 10% y 30% del polímero. Esto reduce proporcionalmente la capacidad de intercambio iónico. Las resinas gelatinosas por lo general tienen mayores eficiencias de funcionamiento y son de menor costo. Un macroporo proporciona mejor estabilidad física, principalmente debido a su estructura con apariencia esponjosa, que libera la presión de mejor manera. Asimismo elimina parte del rompimiento que puede ocurrir debido a la presión osmótica. Mientras mayor sea el área en una resina aniónica macroporosa, mejor será su resistencia a la incrustación. En una resina catiónica, un mayor nivel de entrecruzamiento proporciona mejor resistencia a la oxidación. Existen dos tipos principales de estructuras químicas, estirénicas y acrílicas. Los materiales a base de estireno descritos anteriormente son hidrocarburos aromáticos. Las resinas acrílicas son hidrocarburos de cadena recta basadas en poliacrilato y polimetacrilato. El DVB aún se utiliza como entrecruce en estas resinas, pero los acrílicos difieren de los estirénicos en que el sitio de intercambio activo es parte de la estructura física. Esto significa que sus estabilidades físicas y químicas están entrecruzadas. Cuando una resina acrílica se degrada químicamente, ocurre por lo general en el sitio de intercambio, que es el eslabón más débil. Esto destruye la estructura física. Cuando se oxida una resina acrílica, ésta se hinchará y ablandará. Otra desventaja de los materiales acrílicos es que no están totalmente aprobados por la Asociación de Alimentos y Drogas (FDA *) de EE.UU. Por lo tanto, están por lo general limitados a aplicaciones industriales. Es de provecho usar los acrílicos en aplicaciones donde existen materias orgánicas, porque no causan tanta incrustación como los productos a base de estireno.

Selectividad de resinas

La selectividad o afinidad de resinas de intercambio iónico es influida por las propiedades de la esfera, los iones intercambiados, y la solución en la cual están presentes los iones.

El agua es un componente esencial en las resinas de intercambio iónico. Por ejemplo, las resinas catiónicas de ácido fuerte contienen más o menos 50% de humedad. La cantidad de entrecruzamiento de la esfera tiene un impacto sobre el contenido de humedad de la esfera, y por su parte, el contenido de humedad tiene un impacto sobre la selectividad. Una esfera con un alto contenido de humedad tiene alta porosidad y los grupos activos se encuentran más separados uno del otro. Las resinas de intercambio iónico por lo general tienen una mayor selectividad hacia los iones de mayor valencia o carga. Entre los iones con una misma carga se encuentran mayores afinidades hacia los iones con un número atómico más alto. Estas relaciones de afinidad son revertidas en soluciones concentradas. Esto es lo que hace posible la regeneración de las resinas agotadas. Una resina catiónica agotada que se utiliza para suavizar por lo general se encuentra en forma de calcio o magnesio, de los cuales ambos son iones bivalentes. La resina es restaurada a su condición regenerada, la forma del sodio, introduciendo una solución de 10% de cloruro de sodio. Esta solución de cloruro de sodio se encuentra lo suficientemente concentrada -100,000 partes por millón (ppm)- como para revertir la selectividad. La fuerza impulsadora del ion monovalente de sodio luego convierte la resina a la forma de sodio.

Cinética

La tasa de intercambio, o cinética, de las reacciones de intercambio iónico es gobernada por varios factores. La solución que está siendo tratada tiene un efecto; las concentraciones más

altas de solución pueden acelerar la velocidad de la reacción. La cantidad de entrecruzamiento de DVB en la esfera determina la porosidad de la esfera y, además, la movilidad iónica dentro de la esfera. El tamaño de los iones que están siendo intercambiados también influye en la velocidad cinética y depende un tanto del tamaño de los poros en la estructura de la resina. El tamaño de la esfera también tiene un efecto; las esferas más pequeñas presentan una vía de difusión más corta hacia los sitios activos en la parte interior de las esferas. La resina tiene una mayor afinidad hacia los iones de mayor valencia, por lo que la predominancia de iones de alta valencia puede causar una mayor tasa de reacción. Otros elementos que influyen incluyen la temperatura, la forma iónica de los sitios de intercambio, y la fortaleza de los sitios de intercambio. Una mayor temperatura puede acelerar las reacciones químicas. La reacción de intercambio es un proceso de difusión, por lo que la tasa de difusión en el sitio de intercambio iónico tiene algún efecto. Además, la fortaleza del sitio de intercambio, ya sea fuerte o débilmente ácido o básico, afecta la tasa de reacción.

Las resinas, sus aplicaciones comunes de reducción / remoción

Problema	Resina	Regenerante
Alcalinidad	ABF II	NaCl o KCl
Arsénico ⁺⁵	ABF I	NaCl o KCl
Cianuro	ABF I	NaCl o KCl
Cobre	CAF	NaCl o KCl
Hierro	CAF	NaCl o KCl
Nitrato	ABF II	NaCl o KCl
Selenio	ABF I	NaCl o KCl
Radio	CAF	NaCl o KCl
Su Ifatos	ABF II	NaCl o KCl
Uranio	ABF II	NaCl o KCl
Fluoruro	ABF II	NaCl o KCl

Donde:

CAF = intercambiador catiónico de ácido fuerte

ABF I = anión de base fuerte Tipo I

ABF II = anión de base fuerte Tipo II

Tipos de resinas de Intercambio Iónico

Resinas catiónicas de ácido fuerte: Las resinas catiónicas fuertemente ácidas derivan su funcionalidad de los grupos ácidos sulfónicos. Estos intercambiadores catiónicos de ácido fuerte funcionan a cualquier nivel de pH, dividen todas las sales, y requieren una cantidad sustancial de regenerante. Esta es la resina que se escoge para casi todas las aplicaciones de suavizado y como primera unidad en un desmineralizador de dos lechos, o como componente catiónico de un lecho mixto.

Resinas catiónicas de ácido débil: Las resinas catiónicas débilmente ácidas contienen grupos carboxílicos como sitios de intercambio. La resina es altamente eficiente, ya que es regenerada con casi 100% de la cantidad estequiométrica de ácido, comparado con el 200% a 300% requerido para los cationes de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo, temperaturas bajas, y una proporción entre la dureza y la alcalinidad menor de 1.0. Se utilizan muy efectivamente en combinación con una resina catiónica de ácido fuerte que funciona en forma de hidrógeno, ya sea en configuración de lecho separado o lecho estratificado. En ambos casos, el agua influyente se pone en contacto con la resina catiónica de ácido débil donde se eliminan los cationes que están asociados con la alcalinidad. Los cationes restantes son eliminados por la resina catiónica de ácido fuerte. La resina catiónica de ácido débil es regenerada con el ácido de desecho de la unidad de ácido fuerte, proporcionando un arreglo muy económico.

Resinas aniónicas de base fuerte: Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario. Los dos grupos principales de resinas aniónicas de base fuerte son las de Tipo 1 y Tipo 2, dependiendo del tipo de amina que se utiliza durante el proceso de activación química. Químicamente, los dos tipos difieren en el tipo de especie de sitios de intercambio de amonio cuaternario que exhiben: los sitios de Tipo 1 tienen tres grupos de metilo; en los de Tipo 2, un grupo de etanol reemplaza a uno de los grupos de metilo. Las resinas de Tipo 1 son adecuadas para la eliminación total de aniones en

todas las aguas. Son más difíciles de regenerar y se hinchan más al pasar de la forma de cloruro a la de hidróxido que las de Tipo 2. Son más resistentes a altas temperaturas y deben ser usadas en aguas de alta alcalinidad y alto contenido de silicio.

Las resinas de tipo 2 también presentan la eliminación de todos los aniones, pero pueden ser menos efectivas en eliminar el silicio y dióxido de carbono de las aguas donde estos ácidos débiles constituyen más del 30% del total de aniones. Los aniones de Tipo 2 brindan mejores resultados en aguas que contienen predominantemente ácidos de minerales libres -cloruros y sulfatos- como en el efluente de una unidad de catión seguida por un descarbonador. Las resinas de Tipo 2 que funcionan en forma de cloruro son típicamente usadas en desalcalinizadores.

Resinas aniónicas de base débil: Las resinas aniónicas de basicidad débil contienen el grupo funcional de poliamina, que actúa como adsorbedor de ácido, eliminando los ácidos fuertes -acidez de mineral libre- de la corriente del efluente de cationes. Esta resina débilmente ionizada es regenerada de manera eficiente por cantidades de base casi estequiométricas -tales como el hidróxido de sodio- que restauran los sitios de intercambio a la forma de base libre. El paso de regeneración es esencialmente una neutralización de los ácidos fuertes que son recolectados en la resina y puede usar desechos cáusticos de una unidad aniónica de base sólida para realzar la economía. Las resinas aniónicas débiles deben ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio.

Conclusión

Las resinas de intercambio iónico descritas pueden tener diversos usos comerciales e industriales, incluyendo la suavización, desalcalinización, desmineralización, eliminación de nitratos, refinación de condensados, control de contaminación, y muchos otros. La selección de resinas apropiadas para aplicaciones específicas se determina a través del análisis del agua de alimentación y la calidad de efluente que se desea.

A continuación se esquematizan diferentes arreglos de intercambiadores iónicos utilizados en la industria del agua utilizando diferentes combinaciones de lechos y su poder de remoción.-

