



## حذف رنگزای اسید آبی ۲۹۲ با استفاده از پلی آلومینیوم کلرید

مریم حسنی زنونزی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا علوی مقدم<sup>۲\*</sup>، مختار آرامی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۵/۱۴ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۷/۶/۲۸

### چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی شرایط کاربرد و عملکرد پلی آلومینیوم کلرید به عنوان یک ماده منعقدکننده در حذف رنگزای اسید آبی ۲۹۲ است که یکی از رنگزاهای اصلی مورد استفاده در صنعت نساجی ایران می باشد. برای این منظور تأثیر pH غلظت ماده منعقدکننده، غلظت اولیه رنگزا، و نیز تأثیر کائولینیت به عنوان یک کمک منعقدکننده طبیعی برای حذف رنگزای مذکور، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، مناسب ترین محدوده pH برای حذف رنگزا توسط پلی آلومینیوم کلرید، ۶-۸ می باشد و تحت این شرایط، با استفاده از ۴۰ mg/L پلی آلومینیوم کلرید، میزان حذف رنگزای مورد نظر بیش از ۸۳٪ است که این غلظت به عنوان غلظت بهینه پلی آلومینیوم کلرید برای حذف رنگزای مذکور انتخاب شد. افزودن کائولینیت به عنوان کمک منعقدکننده، بازدهی فرآیند را به طور نسبی افزایش داد که بیشترین افزایش بازدهی (۳۰٪) با افزودن ۴۰ mg/L کائولینیت به فرآیند به دست آمد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش غلظت رنگزا، موجب کاهش بازدهی فرآیند شد به طوری که میزان حذف برای رنگزا با غلظت ۲۵ و ۲۵۰ mg/L به ترتیب ۹۵٪ و ۲۱٪ بود.

واژه های کلیدی: انعقاد و لخته سازی، حذف رنگزا، پلی آلومینیوم کلرید.

## Removal of C.I. Acid Blue 292 using Polyaluminum Chloride

M. Hasani Zonoozi<sup>1</sup>, M. R. Alavimoghaddam<sup>\*1</sup>, M. Arami<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15874-4413, Tehran, Iran

### Abstract

This study aims to investigate the performance of polyaluminum chloride (PAC) as a coagulant to remove Acid blue 292 (AB292), which is used widely in textile industry in Iran. The effect of pH, coagulant dosage, kaolinite (as a natural coagulant aid), and initial dye concentration were examined in the coagulation process with PAC. Results showed that the optimum pH range to remove AB292 was 6-8. In such conditions, the dye removal using 40 mg/L of PAC was more than 83%. This dosage (40 mg/L) was considered as the optimum dosage of PAC to remove AB292. Addition of kaolinite as a coagulant aid increased the efficiency of the process. With the aid of 40 mg/L kaolinite, dye removal efficiency increased by 30% when the coagulant dosage was 30 mg/L. As the initial dye concentration increased, the dye removal efficiency decreased, so that the efficiency for dye concentrations of 25 and 250 mg/L was 95% and 21%, respectively. J. Color Sci. Tech. 2(2008),87-94. © Institute for Colorants, Paint and Coatings.

**Keyword:** Coagulation and flocculation, Dye removal, Polyaluminum chloride.

## ۱- مقدمه

منعقدکننده‌های پلیمری معدنی (IPFs)<sup>۲</sup> با استفاده از نمک‌های معمول آهن و آلومینیوم تهیه شدند [۳،۹]، و به طور روزافزونی در بسیار از نقاط دنیا به ویژه در چین، ژاپن، روسیه و کشورهای اروپای غربی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. از جمله برتری‌های منعقدکننده‌های پلیمری معدنی نسبت به منعقدکننده‌های متداول می‌توان به کارایی مناسب در محدوده گسترده‌تری از pH و کارایی بهتر در دماهای مختلف بویژه در دماهای پایین اشاره کرد [۱۰،۱۱]. پلی‌آلومینیوم کلرید (PAC)<sup>۳</sup> یکی از مهمترین انواع IPFها می‌باشد که نسبت به گونه‌های دیگر کاربرد بیشتری دارند [۳،۹]. هرچند که استفاده از این ماده و تحقیق در رابطه با آن در کشور ما هنوز گسترش چندانی نیافته است.

هدف از انجام این تحقیق بررسی شرایط به کارگیری و عملکرد پلی‌آلومینیوم کلرید در حذف رنگزای اسید آبی ۲۹۲ (AB292)<sup>۴</sup> از پساب‌های صنعتی می‌باشد. برای این منظور تأثیر pH، غلظت ماده منعقدکننده، غلظت رنگزا و نیز تأثیر کاتولینیت به عنوان یک ماده کمک منعقدکننده، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد شیمیایی و وسایل

در این تحقیق، PAC صنعتی جامد (شرکت فالیزان تصفیه) با درجه خلوص ۳۰٪ (w/w)، رنگزای اسید آبی ۲۹۲، سود، اسید سولفوریک، کاتولینیت و دستگاه‌های جارست (شرکت زاگ شیمی)، pH متر مدل ۳۴۰i (WTW) و اسپکتروفوتومتر مدل DR/4000 (HACH) استفاده شد.

### ۲-۲- روش کار

برای تهیه محلول‌های حاوی رنگزا، ابتدا محلول رنگزای اصلی با غلظت ۱۰۰۰ mg/L تهیه و سپس با استفاده از آب مقطر برای رسیدن به غلظت‌های مورد نظر رقیق گردید. برای تنظیم pH از محلول‌های سود و اسید سولفوریک استفاده شد. کاتولینیت به منظور استفاده به عنوان کمک منعقدکننده، ابتدا آسیاب شده و سپس از الک ۷۵ μm عبور داده شد. برای انجام آزمایش‌ها از ذرات عبوری از این الک استفاده گردید. طول موج ماکزیمم رنگزا ( $\lambda_{max}$ )، برابر با ۶۳۲ nm بود که با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR/4000 (HACH) به دست آمد. تغییرات pH (در محدوده ۱۲-۳) تأثیری در مقدار  $\lambda_m$  رنگزا نداشت، از این رو اندازه‌گیری جذب تمام نمونه‌ها در همین  $\lambda_m$  انجام گرفت. رابطه بین غلظت رنگزا (C) برحسب mg/L و میزان جذب آن (A) با استفاده از چند نمونه حاوی غلظت‌های مشخصی از رنگزا تعیین شد. بازدهی فرآیند با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید:

رنگزاهای یکی از مهمترین مواد شیمیایی مورد مصرف در بسیاری از صنایع نظیر نساجی، رنگ و کاغذسازی هستند. تخلیه پساب‌های حاوی مواد رنگی به محیط از قبیل دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، موجب کاهش انتقال نور، کاهش میزان اکسیژن محلول و افزایش اکسیژن شیمیایی مورد نیاز (COD)<sup>۱</sup> می‌شود و از این طریق زندگی آبزیان را مختل می‌کند. به علاوه محققان دریافته‌اند که برخی از رنگزاهای می‌توانند در طی فرآیند تجزیه احیایی، آمین‌های آروماتیک سرطاناتزا تولید کنند [۱-۳]. بدون تصفیه کافی و مناسب، این ترکیبات قادرند برای مدت زمان بسیار طولانی و به صورت پایدار در محیط باقی بمانند [۴]. در سال‌های اخیر قوانین مرتبط با آلاینده‌های رنگی در سراسر دنیا، روز به روز دقیق‌تر و سختگیرانه‌تر شده‌اند. بنابراین باید این ترکیبات قبل از تخلیه به محیط‌های طبیعی، از پساب‌های صنعتی حذف شوند.

ترکیبات رنگی ساختارهای مقاوم و پیچیده‌ای دارند به همین دلیل حذف آنها با استفاده از روش‌های بیولوژیکی مشکل است و به زمان طولانی و شرایط کنترل شده نیاز دارد. متداول‌ترین روش‌ها برای رنگبری از پساب‌های صنعتی شامل روش‌های فیزیکی - شیمیایی نظیر انعقاد و لخته‌سازی، جذب با استفاده از کربن فعال، اسمز معکوس، استفاده از فیلترهای غشایی و اکسیداسیون پیشرفته می‌باشند. بیشتر این روش‌ها هزینه بهره‌برداری و نگهداری بالایی دارند [۳،۵] و به همین دلیل استفاده از آنها برای تصفیه پساب‌های رنگی برای بسیاری از کشورها مناسب و مقرون به صرفه نمی‌باشد.

انعقاد و لخته‌سازی یکی از متداول‌ترین و مؤثرترین فرآیندهایی است که برای تصفیه پساب‌های رنگی به کار می‌رود [۳،۶،۷]. از مهمترین مزایای رنگبری با استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، عدم تولید محصولات میانی سمی و مضر است که دلیل آن تجزیه نشدن ترکیبات رنگی در این روش می‌باشد. به علاوه این روش از صرفه اقتصادی و قابلیت اجرایی نسبتاً بالا در مقیاس‌های بزرگ برخوردار است [۷،۹]. از محدودیت‌های این روش این است که برخی از رنگزاهای دارای وزن مولکولی کوچک و رنگزاهای کاتیونی، ممکن است با بازدهی کمی در این روش حذف شوند. به طور کلی مواد آلی با زنجیره‌های مولکولی بزرگ‌تر و وزن مولکولی بیشتر، برای حذف با استفاده از روش انعقاد و لخته‌سازی مناسب‌ترند. دفع لجن تولید شده، مشکل دیگری است که در رابطه با این روش وجود دارد [۳،۷،۸].

نمک‌های آلومینیوم و آهن متداول‌ترین منعقدکننده‌هایی هستند که تاکنون برای تصفیه آب و پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما در سال‌های اخیر نوع جدیدی از مواد منعقدکننده تحت عنوان

2- Inorganic polymer flocculants or IPFs

3- Polyaluminum chloride

4- Acid Blue 292

1- Chemical oxygen demand

### ۳-۱- تعیین pH بهینه

نتایج تحقیقات انجام شده توسط بسیاری از محققان تأییدکننده این موضوع است که pH عامل بسیار مؤثری در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی است. هر ماده منعقدکننده دارای یک محدوده pH بهینه است که در آن، فرآیند انعقاد و لخته‌سازی برای غلظت مشخصی از ماده منعقدکننده، در کوتاهترین زمان ممکن و با بالاترین بازدهی صورت می‌گیرد. از این رو، تعیین این عامل برای کسب اطمینان از عملکرد مناسب فرآیند انعقاد و لخته‌سازی ضروری است. محققان تنها روش مطمئن برای تعیین محدوده pH مناسب در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی را روش آزمون و خطا و استفاده از نتایج آزمایشگاهی معرفی کرده‌اند [۱۳]. برای تعیین pH بهینه، PAC با غلظت ثابت ۱۰۰ mg/L به همه نمونه‌ها افزوده شد. سپس آزمایش جار بر روی نمونه‌ها در pHهای مورد نظر انجام گردید. غلظت رنگرا در همه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۱۰۰ mg/L بود. در شکل ۱ تأثیر pH بر میزان حذف رنگزای AB292 توسط PAC نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، حذف رنگزای AB292 با استفاده از PAC، نسبت به تغییرات pH بسیار حساس می‌باشد و در محدوده pH برابر با ۸-۶ به بیشترین مقدار خود رسیده است. به عبارت دیگر در این محدوده از pH، رسوب تشکیل شده در طی فرآیند و یا همان محصولات هیدرولیز PAC، دارای کمترین حلالیت هستند. در بهترین شرایط یعنی در pH برابر با ۷، حدود ۹۵٪ از رنگزای موجود در محلول حذف گردید. نکته قابل توجه دیگر آن است که اندازه لخته‌های تشکیل شده، در محدوده pH بهینه در مقایسه با pHهای دیگر، به طور مشخصی بزرگ‌تر بود.

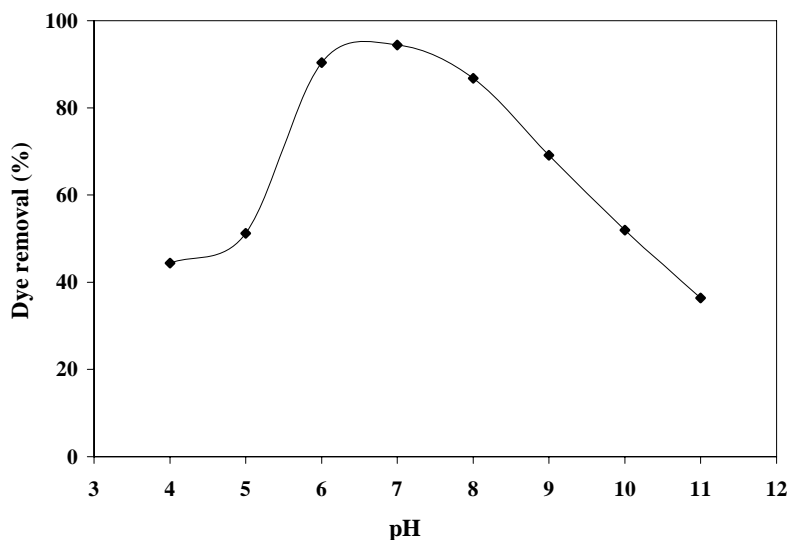
$$(۱) \quad \frac{C_r - C_l}{C_r} \times 100 = \text{میزان حذف رنگزا } (\%)$$

که در آن  $C_l$  و  $C_r$ ، به ترتیب غلظت رنگزا در پساب خام و پساب تصفیه شده هستند.

در این تحقیق، تأثیر عوامل مختلف با استفاده از روش آزمایش جارتست تعیین گردید. برای این منظور، اختلاط سریع اولیه به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۲۰۰ rpm، و اختلاط آهسته به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰ rpm صورت گرفت. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه در حالت سکون قرار گرفتند تا لخته‌های تشکیل شده در طی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی ته‌نشین شوند. پس از این مرحله، برای اندازه‌گیری اکسیژن شیمیایی مورد نیاز و غلظت نهایی رنگزا، با استفاده از پیپت از حدود ۲ سانتی‌متری زیر سطح هر محلول نمونه‌گیری به عمل آمد. ضمناً، آزمایش اندازه‌گیری COD بر مبنای روش شماره ۵۲۲۰ کتاب استاندارد متد و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام گرفت [۱۲].

### ۳-۲ نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده در رابطه با تعیین pH بهینه، تأثیر غلظت پلی‌آلومینیوم کلرید به عنوان ماده منعقدکننده، تأثیر کاتولینیت به عنوان یک ماده کمک منعقدکننده طبیعی و نیز تأثیر غلظت رنگزا بر بازدهی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی ارائه شد. برای بررسی جامع‌تر، برخی از نتایج این تحقیق با داده‌های سایر محققین مقایسه گردید.



شکل ۱: تأثیر pH بر میزان حذف رنگزای اسید آبی ۲۹۲ توسط پلی‌آلومینیوم کلرید (رنگزا و PAC هر کدام ۱۰۰ mg/L).

جدول ۱: مقایسه محدوده pH بهینه به دست آمده در این تحقیق با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین در خصوص حذف رنگزها با استفاده از PAC.

مرجع	pH بهینه	نوع PAC مورد استفاده	نوع رنگزا
[۱۴]	۴-۵,۵	PAC صنعتی	ترکیبی از رنگزها: راکتیو قرمز (DB-۸)، راکتیو نارنجی (OGR) و راکتیو سیاه DN
[۳]	کمتر از ۶	PAC صنعتی، جامد	ترکیبی از رنگزها: مستقیم سیاه ۱۹، مستقیم قرمز ۲۸، مستقیم آبی ۸۶
[۱۳]	۹-۹,۵	PAC صنعتی، مایع، با درجه خلوص ۱۷٪ (w/w) بر حسب $Al_2O_3$	ترکیبی از رنگزها: مستقیم نارنجی S، ساندولان قرمز RSNI، پروسپون درخشان آبی Rs
[۱۵]	۶	---	پساب واقعی
تحقیق حاضر	۶-۸	PAC صنعتی، جامد، با درجه خلوص ۲۰٪ (w/w) بر حسب $Al_2O_3$	رنگزای اسید آبی ۲۹۲

کمک می‌کند [۳].

اما با توجه به نمودار شکل ۱، مشاهده می‌شود که در رابطه با رنگزای AB292، بیشترین میزان حذف رنگزا در محدوده pH خنثی می‌باشد و در pHهای اسیدی (کمتر از ۶)، از میزان حذف رنگزا کاسته شده است. به همین دلیل نمی‌توان خنثی‌سازی بار را تنها عامل تشکیل لخته‌ها دانست. به نظر می‌رسد که در این مورد، تشکیل لخته‌ها در محدوده pH ۶-۸ (خنثی)، بیشتر از طریق به دام افتادن مولکول‌های رنگزا در زنجیره‌های پلیمری ماده منعقدکننده انجام شده است که مکانیسم انعقاد جاروبی و به دام افتادن ذرات در رسوب<sup>۲</sup> نام دارد. در این حالت، مولکول‌های رنگزا ممکن است نقش هسته مرکزی رسوبات تشکیل شده را داشته باشند و یا به هنگام ته‌نشینی، در بین آنها به دام افتاده و ته‌نشین شوند.

### ۳-۲- تأثیر غلظت ماده منعقدکننده بر میزان حذف رنگزا و COD

برای بررسی تأثیر غلظت ماده منعقدکننده، آزمایش جار بر روی نمونه‌ها با غلظت رنگزای اولیه ۱۰۰ mg/L، محدوده pH بهینه تعیین شده در مرحله قبل (حدود ۷)، و با غلظت‌های مختلفی از ماده منعقدکننده انجام گرفت. در شکل ۲، تأثیر غلظت ماده منعقدکننده بر میزان حذف رنگزا و میزان COD (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) در pH بهینه نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که

در جدول ۱ برخی از نتایج منتشر شده توسط محققان دیگر در رابطه با محدوده pH بهینه برای حذف رنگزهای مختلف توسط پلی‌آلومینیوم کلرید، ارائه و با نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر مقایسه شده است.

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، محدوده‌های متفاوتی به عنوان pH بهینه برای رنگزهای مختلف گزارش شده است. بدیهی است عوامل مختلفی از قبیل نوع ماده منعقدکننده، نوع و ساختار شیمیایی رنگزا (گروه‌های فعال رنگزا و نیز باری که رنگزا به هنگام حل شدن در آب به دست می‌آورد)، نقش بسیار مؤثری در تعیین pH بهینه دارند [۳، ۱۳].

بررسی مکانیسم حذف رنگزا در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار است. گروه‌های عاملی در رنگزهای اسیدی به شکل گروه‌های آنیونی شامل گروه‌های سولفونیک، هیدروکسیل و کربوکسیل می‌باشند [۱۶]. وجود گروه‌های آنیونی بر روی این رنگزها موجب می‌شود که در هنگام حل شدن در آب، دارای بارهای منفی شوند. از این رو برای انعقاد این رنگزها، لازم است تا بارهای منفی آنها به میزان کافی خنثی گردد. به این ترتیب، انتظار می‌رود که با کاهش pH، روند خنثی‌سازی بارهای منفی با شدت بیشتری صورت بگیرد، زیرا پروتون‌دار شدن مولکول‌های رنگزا در pHهای اسیدی، موجب کاهش تمرکز بار در مولکول‌های رنگزا شده و به خودلخته‌شوندگی<sup>۱</sup>

2- Sweep flocculation and enmeshment in precipitate

1- Self-aggregation

### ۳-۳- تأثیر کاتولینیت به عنوان ماده کمک منعقدکننده بر میزان حذف رنگزا

مواد کمک منعقدکننده مانند سیلیس فعال، خاک رس و پلی الکترولیتها، معمولاً به منظور دستیابی به بازدهی بالاتر در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی، کاهش مقدار ماده منعقدکننده مورد نیاز و تشکیل لخته‌های قوی‌تر و با قابلیت ته‌نشینی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. در این تحقیق، از کاتولینیت به عنوان یک ماده کمک منعقدکننده طبیعی به همراه پلی آلومینیوم کلراید استفاده شد.

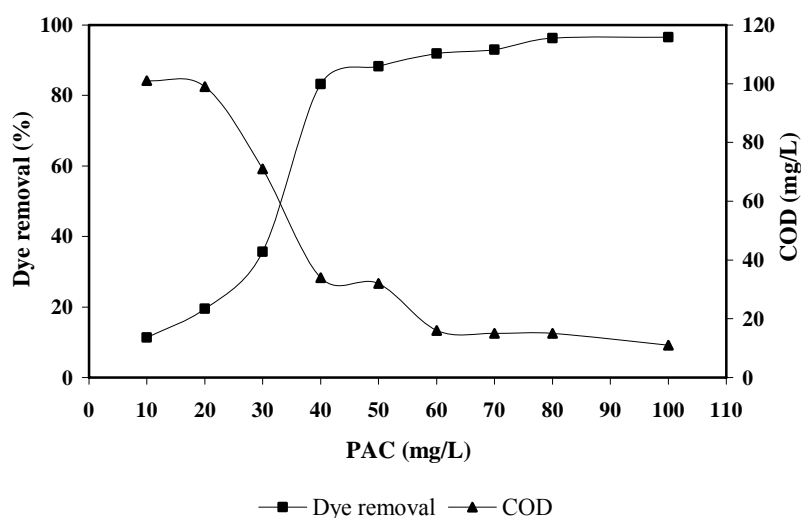
برای انجام این بخش از آزمایش‌ها به نمونه‌ها، غلظت ثابتی از PAC و مقادیر مختلفی از کاتولینیت افزوده گردید. غلظت اولیه رنگزا ۱۰۰ mg/L و pH و تمام نمونه‌ها در حدود ۷ تنظیم شد. آزمایش‌ها برای دو غلظت ۳۰ و ۴۰ mg/L پلی آلومینیوم کلراید به طور جداگانه انجام گرفت. نتایج حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزودن کاتولینیت به عنوان کمک منعقدکننده، بازدهی فرآیند را به طور نسبی افزایش داده است. در بهترین حالت، یعنی هنگامی که غلظت پلی آلومینیوم کلراید و کاتولینیت به ترتیب ۳۰ و ۴۰ mg/L است، میزان افزایش بازدهی ۳۰٪ و درصد حذف از ۳۵ به ۶۵٪ رسیده است. اگرچه در این حالت نیز هنوز مقدار قابل توجهی از رنگزا در پساب باقی مانده است. اما افزایش حذف رنگزا به میزان ۳۰٪ بسیار قابل توجه می‌باشد. برای حالتی که غلظت پلی آلومینیوم کلراید ۴۰ mg/L بود، میزان افزایش بازدهی توسط کاتولینیت ناچیز بود و از ۷٪ بیشتر نشد.

به طور کلی با افزایش غلظت PAC، میزان حذف رنگزا نیز افزایش یافته است. افزودن ۳۰ mg/L پلی آلومینیوم کلراید موجب حذف رنگزا تنها به میزان ۳۵٪ شده است، درحالی که با افزایش غلظت آن به ۴۰ mg/L، میزان حذف رنگزا به طور ناگهانی افزایش یافته و به بیش از ۸۳٪ رسیده است. پس از این مرحله، با افزایش غلظت ماده منعقدکننده، میزان حذف رنگزا به کندی زیاد می‌شود و برای ۱۰۰ mg/L پلی آلومینیوم کلراید به بیش از ۹۶٪ رسیده است. همچنین با افزایش غلظت PAC مقدار COD نیز با روند مشابهی کاهش یافت. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، COD اولیه رنگزا در حدود ۱۰۰ mg/L بود که با استفاده از ۶۰ mg/L پلی آلومینیوم کلراید، بیش از ۸۰٪ آن حذف شد و به ۱۶ mg/L کاهش یافت.

در تعیین غلظت بهینه یک ماده منعقدکننده، عوامل مختلفی نظیر قوانین محیط زیستی مربوطه و نیز قیمت ماده منعقدکننده بسیار تأثیرگذار هستند. در رابطه با حذف رنگزای AB292 با استفاده از پلی آلومینیوم کلراید، و با توجه به نمودار شکل ۲، به نظر می‌رسد که میزان حذف ۸۳٪، یک نقطه ویژه و یا به عبارت بهتر یک نقطه بحرانی در نمودار می‌باشد. چرا که شیب نمودار حذف رنگزا در این قسمت به بیشترین مقدار خود رسیده است. به همین دلیل، با توجه به نمودار یاد شده، غلظت بهینه پلی آلومینیوم کلراید برای حذف رنگزای AB292، ۴۰ mg/L می‌باشد.

باید به این نکته نیز اشاره کرد که با افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید حتی به میزان ۲۰۰ mg/L، هیچگونه پایدارسازی مجدد ذرات<sup>۱</sup> و یا کاهش درصد حذف مشاهده نگردید. این نتیجه به طور مشابه در رابطه با حذف برخی از رنگزاهای مستقیم با استفاده از PAC، توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۳].

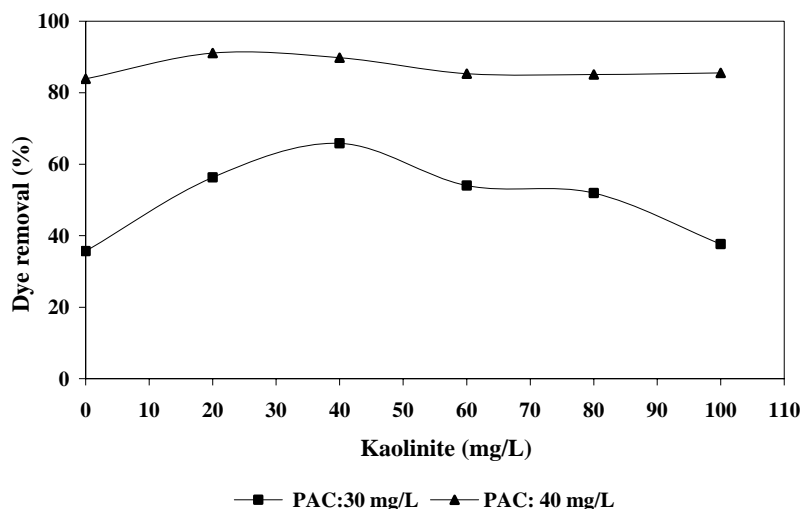


شکل ۲: تأثیر غلظت ماده منعقدکننده بر میزان حذف رنگزا و COD در pH بهینه (رنگزا ۱۰۰ mg/L و pH = ۷).

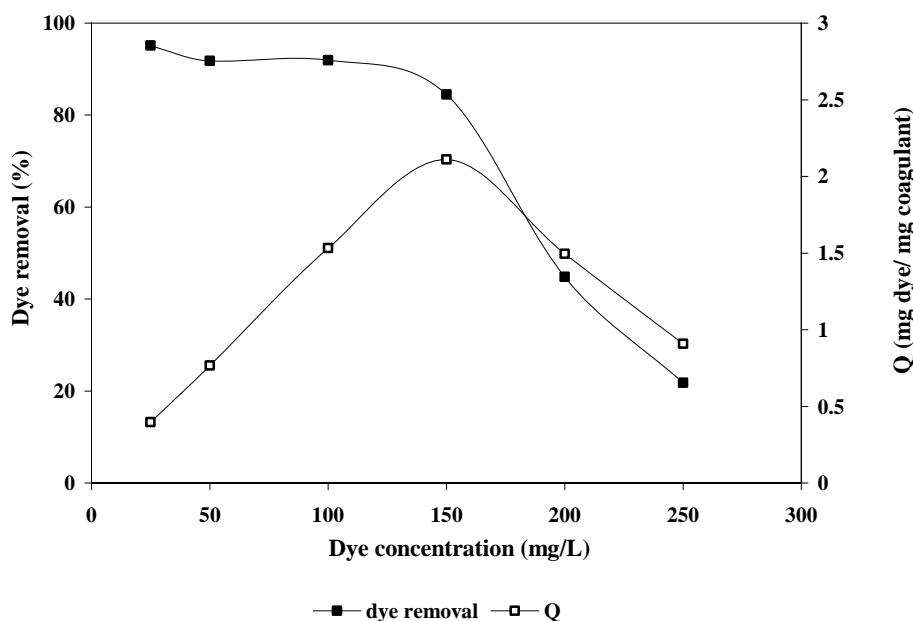
### ۳-۴- تأثیر غلظت اولیه رنگزا بر میزان حذف رنگزا

در این بخش، تأثیر غلظت اولیه رنگزا بر میزان حذف رنگزا در pH بهینه و غلظت ثابتی از PAC (۶۰ mg/L) مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ نمودار تغییرات درصد حذف و مقدار رنگزای حذف شده به ازاء واحد جرم ماده منعقدکننده (Q) در برابر تغییرات غلظت رنگزا نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۵)، با افزایش غلظت رنگزا، بازدهی فرآیند کاسته شده است به طوری که میزان حذف رنگزا با غلظت‌های ۲۵ و ۲۵۰ mg/L به ترتیب ۹۵ و ۲۱٪ بود. نکته قابل توجه دیگر آن است که کاهش بازدهی فرآیند برای

در جدول ۲ نتایج به دست آمده در این تحقیق با داده‌های ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود در برخی از موارد، مواد کمک منعقدکننده تأثیر مثبتی بر فرآیند انعقاد و لخته‌سازی داشتند و در برخی دیگر، به طور معکوس عمل کرده و موجب کاهش درصد حذف شده‌اند. با توجه به این موضوع می‌توان دریافت که عوامل مختلفی از جمله نوع و ساختار شیمیایی رنگزا، نوع ماده منعقدکننده و همچنین ویژگی‌های دیگر محلول مانند pH می‌تواند بر عملکرد ماده کمک منعقدکننده در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی مؤثر باشد.



شکل ۳: تأثیر کائولینیت به عنوان کمک منعقدکننده، بر میزان حذف رنگزا (غلظت رنگزا ۱۰۰ mg/L و pH=۷).



شکل ۴: تأثیر غلظت اولیه رنگزا بر میزان حذف رنگزا و مقدار رنگزای حذف شده به ازاء واحد جرم ماده منعقدکننده (Q).

جدول ۲: مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با داده‌های ارائه شده توسط سایر محققین در رابطه با تأثیر کمک منعقدکننده‌های مختلف در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی.

ماده منعقدکننده	ماده کمک منعقدکننده	نوع تأثیر ماده کمک منعقدکننده	مرجع
آلوم	پلی‌الکترولیت	بدون تأثیر مثبت در حذف رنگزا	[۶]
FeSO <sub>4</sub>	پلی‌الکترولیت	افزایش کدورت و حجم لجن برای غلظت‌های کمتر از ۲ mg/L	[۶]
MgCl <sub>2</sub>	پلی‌الکترولیت	کاهش TSS به میزان ۲۷٪ برای غلظت ۱ mg/L و کاهش حجم لجن به میزان ۱۰٪ برای غلظت ۳ mg/L، بدون هیچگونه تأثیر مثبت در حذف رنگزا	[۶]
FeCl <sub>3</sub>	پلی‌الکترولیت	افزایش TSS، کدورت و حجم لجن	[۶]
آلوم	پلیمر	افزایش حذف رنگزا، بدون تأثیر در حذف COD و کدورت	[۱۸]
MgCl <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	افزایش حذف رنگزا	[۸]
PAC	کائولینیت	افزایش حذف رنگزا به میزان ۳۰٪ برای PAC با غلظت ۳۰ mg/L و کائولینیت با غلظت ۴۰ mg/L	تحقیق حاضر

TSS: Total suspended solids (جامدات معلق کل)

محدوده pH بهینه برای حذف رنگزای AB292 توسط پلی‌آلومینیوم کلرید، برابر ۸-۶ بود. با افزایش غلظت PAC میزان حذف رنگزا نیز افزایش یافت. پایدارسازی مجدد ذرات و یا کاهش درصد حذف در غلظت‌های بالای پلی‌آلومینیوم کلرید مشاهده نگردید. بر اساس بررسی‌های انجام شده، غلظت بهینه پلی‌آلومینیوم کلرید برای حذف رنگزای AB292، ۴۰ mg/L تشخیص داده شد. افزودن کائولینیت به عنوان یک ماده کمک منعقدکننده، بازدهی فرآیند را به طور نسبی افزایش داد. هنگامی که غلظت پلی‌آلومینیوم کلرید ۳۰ mg/L بود، با افزودن ۴۰ mg/L کائولینیت به فرآیند، حذف رنگزا به میزان ۳۰٪ افزایش یافت و از ۳۵ به ۶۵٪ رسید. زمانی که غلظت پلی‌آلومینیوم کلرید ۴۰ mg/L بود، میزان افزایش بازدهی توسط کائولینیت ناچیز بود و در هیچ حالتی از ۷٪ تجاوز نکرد. افزایش غلظت رنگزا، موجب کاهش بازدهی فرآیند شد به طوری که میزان حذف برای رنگزا با غلظت‌های ۲۵ و ۲۵۰ mg/L به ترتیب ۹۵ و ۲۱٪ بود. همچنین با افزایش غلظت رنگزا، Q (مقدار رنگزای حذف شده به ازاء واحد جرم ماده منعقدکننده) در ابتدا افزایش یافت و برای رنگزا با غلظت ۱۵۰ mg/L، به بیشترین مقدار خود یعنی ۲,۱ mg dye/ mg PAC رسید و پس از آن به سرعت کاهش یافت و به ۰,۹ mg dye/ mg PAC

غلظت‌های بالاتر از ۱۵۰ mg/L نسبت به غلظت‌های پایین تر از آن، با شدت بسیار بیشتری رخ داده است به طوری که برای رنگزا با غلظت‌های ۲۵ تا ۱۵۰ mg/L کاهش درصد حذف تنها ۱۰٪ می‌باشد، اما این مقدار برای غلظت‌های ۱۵۰ تا ۲۵۰ mg/L به بیش از ۶۰٪ رسیده است. این نکته می‌تواند از اهمیت بسزایی در تصفیه پساب‌های رنگی برخوردار باشد زیرا با اطلاع از غلظت رنگزا در پساب خروجی کارخانه (ورودی به تصفیه خانه)، می‌توان در رابطه با غلظت مورد نیاز ماده منعقدکننده و یا لزوم استفاده از فرآیندهای تصفیه‌ای دیگر بهتر تصمیم‌گیری کرد. از طرفی، همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت رنگزا، Q در ابتدا افزایش و برای رنگزا با غلظت ۱۵۰ mg/L، به بیشترین مقدار خود یعنی ۱,۵۰ mg dye/ mg PAC رسید. با افزایش غلظت رنگزا به بیش از این مقدار، Q به سرعت کاهش یافته و به ۰,۹ mg dye/ mg PAC برای رنگزا با غلظت ۲۵۰ mg/L رسیده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، pH عامل بسیار مؤثری در حذف رنگزای AB292 بود و تنظیم آن برای استفاده بهینه از ماده منعقدکننده ضروری می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

از زحمات و همکاری‌های صمیمانه سرکار خانم مریم اکبری و سرکار خانم الهام پاسه، کارشناسان آزمایشگاه محیط زیست و مصالح دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر تشکر و قدردانی می‌گردد.

برای رنگزا با غلظت ۲۵۰ mg/L رسید. بر اساس نتایج این تحقیق، پلی‌آلومینیوم کلرید می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب برای انجام فرآیند انعقاد و لخته‌سازی برای حذف رنگزای AB292 مد نظر قرار گیرد.

## ۵- مراجع

1. J. W. Lee, S. P. Choi, R. Thiruvengkatahari, W. G. Shim, H. Moon, Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes. *Dyes Pigments*. 69(2006), 196–203.
2. D. T. Sponza, M. Işık, Toxicity and intermediates of C.I. Direct Red 28 dye through sequential anaerobic/aerobic treatment. *Process Biochem*. 40(2005), 2735–2744.
3. B. Shi, G. Li, D. Wang, C. Feng, H. Tang, Removal of direct dyes by coagulation: The performance of preformed polymeric aluminum species. *J. Hazard. Mater*. 143(2007), 567–574.
4. A. B. D. Santos, F. J. Cervantes, J. B. Van Lier, Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technol*. 98(2007), 2369–2385.
5. Y. Yuan, Y. Wen, X. Li, S. Luo, Treatment of wastewater from dye manufacturing industry by coagulation. *J. Zhejiang Univ. Sci. A*. 7(2006), 340-344.
6. G. R. N. Bidhendi, A. Torabian, H. Ehsani, N. Razmkhah, Evaluation of industrial dyeing wastewater treatment with coagulation and polyelectrolyte as a coagulant aid., *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng*. 4(2007), 29-36.
7. V. Golob, A. Vinder, M. Simonic, Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents. *Dyes Pigments*. 67(2005), 93-97.
8. B. Gao, Q. Yue, Y. Wang, W. Zhou, Color removal from dye-containing wastewater by magnesium chloride. *J. Environ. Manage*. 82(2007), 167–172.
9. D. Wang, W. Sun, Y. Xu, H. Tang, J. Gregory, Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*. 243(2004), 1-10.
10. J. Q. Jiang, Development of coagulation theory and pre-polymerized coagulants for water treatment. *Separation and Purification Methods*. 30(2001), 127-142.
11. C. Ye, D. Wang, B. Shi, J. Yu, J. Qu, M. Edwards, H. Tang, Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*. 294(2007), 163–173.
12. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992). 18<sup>th</sup> ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
13. R. Sanghi, B. Bhattacharya, A. Dixit, V. Singh, Ipomoea dasysperma seed gum: An effective natural coagulant for the decolorization of textile dye solutions. *J. Environ. Manage*. 81(2006), 36–41.
14. E. Klimiuk, U. Filipkowska, A. Korzeniowska, Effects of pH and coagulant dosage on effectiveness of coagulation of reactive dyes from model wastewater by polyaluminium chloride. *Polish J. Environ. Studies*. 8(1999), 73-79.
15. S. S. Liu, T. T. Liang, Return sludge employed in enhancement of color removal in the integrally industrial wastewater treatment plant. *Water Res*. 38(2004), 103–110.
16. S. Seydi, Comparison of anionic dyes removal capacity of various adsorbents in anionic dye bath. M.Sc Thesis, Depart. Eng. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (2002).
17. Principles and Practices of Water Supply Operations: Water Treatment. Third Edition, Published by American Water Works Association (AWWA), (2003).
18. D. J. Joo, W. S. Shin, J. H. Choi, S. J. Choi, M. C. Kim, M. H. Han, T. W. Ha, Y. H. Kim, Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer. *Dyes Pigments*. 73(2007), 59-64.