

PENGARUH pH PADA PENCELUPAN BENANG AKRILAT DENGAN ZAT WARNA DISPERSI

EFFECT OF pH IN DYEING OF ACRYLIC YARN WITH DISPERSE DYES

Hardianto¹, Viera Berliana Azzachra

Politeknik STTT Bandung
Jl. Jakarta No. 31 Bandung, Jawa Barat, Indonesia 40272
¹E-mail: hardianto@kemenperin.go.id

Tanggal diterima: 2 Maret 2022, direvisi: 20 Oktober 2022, disetujui terbit: 9 Desember 2022

ABSTRAK

Di industri tekstil, benang akrilat biasanya diwarnai menggunakan zat warna basa. Beberapa literatur menyebutkan bahwa selain oleh zat warna basa, serat akrilat dapat juga diwarnai dengan zat warna dispersi. Namun kenyataannya sangat sulit mendapatkan informasi tentang resep dan kondisi terbaik untuk mewarnai serat akrilat menggunakan zat warna dispersi. Referensi-referensi terdahulu hanya menjelaskan mengenai pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi dalam suasana asam, belum ada yang membahas pengaruh pH dari asam hingga basa terhadap ketahanan warna. Oleh karena itu, artikel ini memaparkan hasil penelitian mengenai proses pencelupan benang akrilat menggunakan zat warna dispersi dalam suasana asam hingga alkali. Temperatur pencelupan yang digunakan adalah 100°C dan waktu selama 45 menit menggunakan mesin celup jenis tertutup. pH pencelupan divariasikan pada pH 5; 6; 7; 8; dan 9 dengan penambahan asam asetat atau natrium karbonat untuk mengetahui kondisi pH yang tepat. Evaluasi yang dilakukan pada sampel yang dicelup yaitu ketahanan warna (K/S), kerataan warna, dan ketahanan luntur warna terhadap pencucian. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diketahui bahwa pH larutan celup sangat mempengaruhi ketahanan warna (K/S) hasil pencelupan benang akrilat menggunakan zat warna dispersi. Untuk warna merah dan kuning, ketahanan warna paling tinggi diperoleh pada kondisi pencelupan pH 7 dengan nilai K/S berturut-turut 3,6652 dan 7,7632. Untuk warna biru, warna paling tua diperoleh pada sampel yang dicelup pada pH 5 dengan nilai K/S yaitu 1,4530. Kondisi pH larutan pencelupan yang semakin tinggi memberikan kerataan warna yang semakin baik. Benang akrilat yang dicelup dengan zat warna dispersi memiliki ketahanan luntur warna terhadap pencucian yang cukup baik dengan rentang nilai sekitar 4 sampai 4-5. Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa benang akrilat dapat dicelup menggunakan zat warna dispersi pada suasana asam (pH 5-6) dan netral (pH 7). Hasil penelitian ini dapat memberikan sumber referensi ilmu pengetahuan mengenai pengaruh pH larutan pencelupan zat warna dispersi pada serat akrilat.

Kata kunci: Pencelupan, benang akrilat, ketahanan warna (K/S), kerataan warna, zat warna dispersi, pH, suasana asam dan basa

ABSTRACT

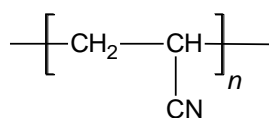
In the textile industry, acrylic yarns are usually dyed using basic dyes. Some literature states that acrylic fibers can also be colored with disperse dyes in addition to basic dyes. However, obtaining information about the recipe and the best conditions for dyeing acrylic fibers using disperse dyes is very difficult. Previous references only explained the dyeing of acrylic fibers with disperse dyes in an acidic medium; no one has discussed the effect of pH from acidic to alkaline on color strength. This paper thus aims to study the dyeing of acrylic yarn using disperse dyes under acidic and alkaline conditions. The dyeing temperature used was 100°C and the time was 45 minutes using a closed-type dyeing machine. The pH of the dyeing bath was varied at pH 5; 6; 7; 8; and 9 with the addition of acetic acid or sodium carbonate to determine the right pH conditions. Evaluations on the dyed samples were color strength (K/S), color level, and colorfastness to washing. Based on the investigations that have been carried out, it is known that the pH of the dyeing solution dramatically affects the color strength (K/S) of acrylic yarn dyed using disperse dyes. For red and yellow, the highest color strength was obtained at pH 7 with K/S values of 3.6652 and 7.7632, respectively. For the blue color, the highest color strength was obtained in the sample dyed at pH 5 with K/S value of 1.4530. The results show that the higher the pH of the dyeing solution, the better the color level. The acrylic yarn samples dyed with disperse dyes have a reasonably good colorfastness to washing, ranging from 4 to 4-5. From this study, it can be concluded that acrylic yarn can be dyed using disperse dyes in acidic (pH 5-6) and neutral (pH 7) conditions. Information from this study can be used as a scientific reference regarding the effect of the pH of the disperse dyeing bath on acrylic fibers.

Keywords: Dyeing, acrylic yarn, color strength (K/S), color level, disperse dyes, pH, acidic and alkaline conditions

PENDAHULUAN

Serat akrilat adalah serat yang mengandung minimal 85% komonomer akrilonitril dalam rantai polimernya.¹⁻⁴ Sejak tahun 1948, perusahaan DuPont sudah memiliki niat untuk memproduksi dan memasarkan serat akrilat secara komersial dengan nama dagang “Orlon”.^{5,6} Keberhasilan pemasaran serat akrilat Orlon oleh DuPont kemudian diikuti oleh perusahaan lain dengan nama dagang seperti Acrilan, Creslan, Courtele, dan lain-lain.⁶

Serat akrilat sering disebut serat poliakrilat karena tersusun atas polimer poliakrilonitril.⁷ Di dalam polimer akrilat terdapat unit yang berulang yaitu akrilonitril seperti dapat dilihat pada Gambar 1.⁶



Gambar 1. Unit Akrilonitril

Selain serat akrilat, ada juga serat modakrilat dan serat vinil lainnya yang mengandung gugus sianida sebagai rantai samping. Berbeda dengan serat akrilat, modakrilat tersusun atas 35 - 85% akrilonitril. Serat-serat tersebut umumnya memiliki sifat ruah (*bulky*), kekuatan yang baik, tahan kusut, serta tampilan estetika serat yang menjadi sifat unggulnya.²

Menurut Cox (2005), seluruh pembuatan serat akrilat komersial dibuat berdasarkan cara polimerisasi radikal bebas; dengan teknik ini memungkinkan untuk menggabungkan komonomer lainnya dan yang terpenting biasanya dapat memberikan tempat zat warna pada proses pencelupan. Penambahan komonomer ini dilakukan karena bila serat akrilat seluruhnya terdiri dari poliakrilonitril, struktur serat menjadi sangat rapat dan kristalin sehingga menjadikannya sulit untuk diwarnai.² Selain itu, penambahan komonomer ini untuk menambah sifat kelarutan di dalam pelarut pada proses pemintalannya.⁸ Keberadaan jenis monomer lain pada rantai polimer tersebut menyebabkan turunnya kristalinitas polimer secara keseluruhan serta menurunkan temperatur transisi gelasnya, sebagai contoh komonomer vinil klorida atau vinil asetat membuat temperatur transisi gelas turun menjadi 75°C sehingga polimer tersebut memiliki sifat mudah untuk dicelup atau diwarnai.⁹ Serat akrilat yang diproduksi saat ini umumnya tersusun atas kopolimer akrilonitril dan monomer lain seperti vinil asetat, metil akrilat, atau metil metakrilat.¹⁰ Serat akrilat tahan terhadap asam lemah dan alkali lemah tapi larut dalam asam nitrat pekat dan asam sulfat pekat, serta terdegradasi dalam alkali pekat panas.¹

Struktur kimia serat akrilat terdiri atas gugus anionik seperti sulfonat ($-SO_3H$) dan karboksilat ($-COOH$) sehingga jenis zat warna yang paling banyak digunakan untuk mewarnai serat ini adalah zat warna kationik atau disebut juga zat warna basa.⁷ Pencelupan serat akrilat dengan zat warna kationik cukup problematik karena umumnya zat warna kationik memiliki sifat migrasi yang rendah pada serat poliakrilonitril serta substantivitas yang tinggi dan *rapid uptake* (serapan cepat) yang mengakibatkan sulitnya mendapatkan hasil celup yang rata (*level dyeing*), sehingga untuk mengatasinya seringkali ditambahkan suatu zat kimia yang disebut *retarding agent*.¹¹

Beberapa sumber menyebutkan bahwa serat akrilat dapat juga diwarnai menggunakan zat warna dispersi tetapi warnanya cenderung muda.^{7,12,13} Sayangnya, sumber-sumber tersebut tidak menjelaskan resep dan kondisi pencelupan untuk mewarnai serat akrilat dengan zat warna dispersi. Selain itu, sulit sekali mendapatkan referensi terbaru mengenai pencelupan serat akrilat menggunakan zat warna dispersi. Hal ini menandakan pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi jarang dilakukan, padahal potensinya cukup besar karena pada proses pencelupannya tidak memerlukan *retarding agent* seperti pada proses pencelupan akrilat dengan zat warna basa dan temperatur pencelupannya cukup di kisaran 100-110°C untuk menghindari terjadinya mengkeret yang berlebihan pada serat akrilat bila dicelup pada temperatur yang melebihi 110°C,¹⁴ sehingga energi yang diperlukan menjadi lebih rendah. Alasan itulah yang menyebabkan pencelupan serat akrilat menggunakan zat warna basa juga dilakukan pada temperatur 100-110°C. Terjadinya mengkeret serat akrilat pada temperatur tinggi juga dibuktikan oleh hasil penelitian Azeem dkk.¹⁵

Prinsip pewarnaan zat warna dispersi pada serat akrilat sama dengan pada serat poliester, yaitu melalui mekanisme *solid solution*^{16,17} dan memerlukan zat pendispersi dalam proses pencelupan untuk menjaga kestabilan dispersi zat warna.¹² Kristalinitas rantai polimer serat akrilat yang tinggi dapat dikurangi dengan penambahan komonomer pada saat pembuatan seratnya sehingga dapat diwarnai dengan proses pencelupan (*dyeable*).² Komonomer yang ditambahkan seperti metil akrilat, vinil asetat, metil metakrilat, akrilamida, sodium stirena sulfonat, dan lain-lain.¹

Zat warna dispersi memiliki afinitas yang rendah dalam serat akrilat sehingga jumlah zat warna yang terserap dalam serat akrilat sedikit. Inilah yang menyebabkan pencelupan serat akrilat menggunakan zat warna dispersi menghasilkan warna yang muda sampai sedang.^{14,17}

Penyebab rendahnya afinitas zat warna dispersi pada serat akrilat masih belum jelas, namun

menurut literatur, perbedaan afinitas zat warna dispersi pada berbagai serat adalah akibat dari perbedaan jumlah gugus kristalin atau gugus lain yang tidak dapat diakses oleh zat warna dispersi.^{11,18} Walaupun demikian, sifat pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi yaitu kerataan warna hasil pencelupan sangat baik¹⁴ sehingga tidak perlu ada penambahan *retarding agent* pada proses pencelupannya.

Referensi-referensi mengenai pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi belum ada yang membahas pengaruh pH dari asam hingga basa terhadap ketuaan warna. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan penelitian proses pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi untuk mempelajari pengaruh pH terhadap hasil pencelupan seperti ketuaan warna dan kerataan warna.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan adalah benang akrilat. Zat warna dispersi yang digunakan adalah C.I. *Disperse Red 343 (type E)*, C.I. *Disperse Yellow 54 (type E)*, C.I. *Disperse Blue 60 (type S)*. Struktur zat warna yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Zat pendispersi yang digunakan adalah Setamol WS jenis anionik (Archroma). Univadine DIF (Huntsman) sebagai *diffusion accelerant*. Untuk mengatur pH larutan celup digunakan asam asetat 30% (pH asam) atau natrium karbonat (pH basa), keduanya kualitas teknis dari Bratachem.

Tabel 1. Zat Warna yang Digunakan dalam Penelitian

No	Colour Index	Struktur Kimia
1	<i>Disperse Red 343</i>	
2	<i>Disperse Yellow 54</i>	
3	<i>Disperse Blue 60</i>	

Peralatan

Proses pencelupan dilakukan pada mesin *Rapid HT Dyeing* (Haesko, China). Pengeringan benang akrilat dilakukan pada mesin stenter laboratorium (Eiko Industrial Co., Ltd. Model DK-5E, Jepang). Gelas piala digunakan untuk membuat larutan zat warna.

Prosedur Penelitian

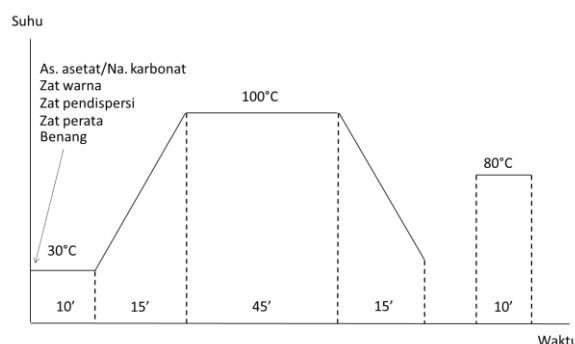
Benang akrilat dipotong dan ditimbang seberat 3 gram. Zat warna dispersi, Setamol WS, Univadine DIF disiapkan sesuai resep pencelupan (lihat Tabel 2). Air yang sudah diukur sesuai resep pencelupan dimasukkan ke dalam tabung *rapid*, kemudian zat pembantu yang sudah disiapkan dimasukkan ke dalam tabung dan pH disesuaikan dengan variasi resep. Setelah itu, zat warna dispersi dimasukkan ke dalam tabung tersebut dan diaduk. Terakhir benang akrilat dimasukkan ke dalam larutan celup dan didiamkan selama 10 menit sesuai skema proses (Gambar 2).

Tabel 2. Kondisi Pencelupan

Uraian	Keterangan
Zat warna dispersi	2% owf
Setamol WS	1 g/L
Univadine DIF	0,5 ml/L
pH	pH 5; 6; 7; 8; 9
Temperatur	100°C
Waktu	45 menit
Vlot	1 : 20

Setelah 10 menit, tabung *rapid* dimasukkan ke dalam mesin celup *rapid* yang sudah dipanaskan sampai 100°C dan proses pencelupan dikerjakan selama 45 menit (lihat Gambar 2). Setelah selesai, tabung *rapid* dikeluarkan dari mesin, kemudian benang dikeluarkan dari tabung dan dicuci dengan air dingin mengalir. Setelah itu, benang dicuci dalam larutan sabun panas selama 10 menit (lihat

Tabel 3), dilanjutkan dengan pembilasan dengan air dingin sampai bersih. Benang akrilat kemudian diperas dan dikeringkan.



Gambar 2. Skema Proses Pencelupan

Pengujian ketuaan warna (K/S) dilakukan menggunakan Spektrofotometer CM-3600d. Kerataan warna dihitung berdasarkan standar deviasi dari lima data pengukuran di lima titik yang berbeda. Ketahanan luntur terhadap pencucian diuji sesuai SNI ISO 105-C06:2010 menggunakan mesin cuci Washtec P.

Tabel 3. Kondisi Pencucian Sabun Panas

Uraian	Keterangan
Sabun	1 g/L
Vlot	1 : 20
Waktu	10 menit
Temperatur	80°C

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketuaan Warna

Hasil pencelupan benang akrilat menggunakan zat warna dispersi pada berbagai kondisi pH dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Benang Akrilat Setelah Pencelupan

Warna	pH				
	5	6	7	8	9
Merah					
Kuning					
Biru					

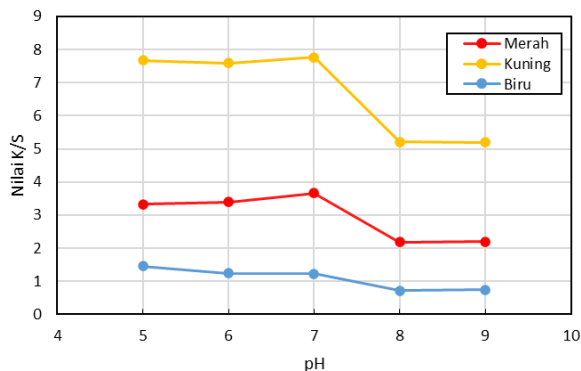
Data pengujian ketuaan warna (K/S) benang hasil pencelupan dapat dilihat pada

Tabel 5, sedangkan grafik ketuaan warna berdasarkan variasi pH disajikan pada Gambar 3.

Tabel 5. Data Pengujian Ketuaan Warna (K/S) pada Berbagai Kondisi pH

Warna	Nilai K/S				
	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9
Merah	3,3227	3,4015	3,6652	2,187	2,1997
Kuning	7,6691	7,5857	7,7632	5,2165	5,1904
Biru	1,4530	1,2488	1,2343	0,7188	0,7393

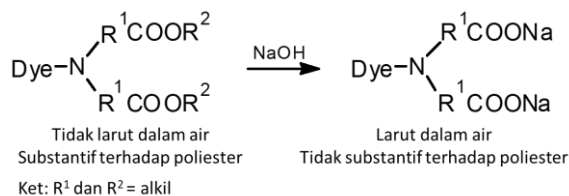
Keterangan: K/S diukur pada panjang gelombang 520 nm (merah), 440 nm (kuning), dan 640 nm (biru)



Gambar 3. Grafik Ketuaan Warna (K/S)

Pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa nilai ketuaan warna (K/S) turun drastis dari pH 7 menuju ke pH 8 dan pH 9. Hal ini dapat disebabkan oleh terjadinya perubahan arah warna pada suasana alkali. Arah warna berubah terutama pada sampel hasil celup kondisi pH 9.

Terjadinya perubahan warna pada hasil pencelupan salah satunya dapat diakibatkan oleh sifat kestabilan zat warna dalam kondisi pH alkali kurang baik. Zat warna yang tidak stabil dalam suasana alkali (*alkali unstable disperse dyes*) akan mudah terhidrolisis dan terdekomposisi dalam suasana alkali.^{19,20} Contohnya zat warna dispersi yang memiliki gugus ester akan terhidrolisis dalam larutan alkali menjadi zat warna yang larut di dalam air serta tidak memiliki afinitas lagi terhadap serat poliester.²¹ Terjadinya hidrolisis zat warna dispersi pada poliester oleh alkali juga dijelaskan oleh Brierley dan Provost,²² seperti yang digambarkan oleh reaksi pada Gambar 4.



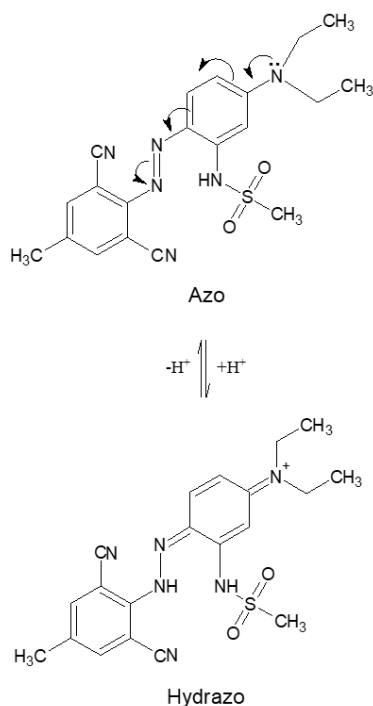
Gambar 4. Reaksi Hidrolisis Zat Warna Dispersi yang Mengandung Gugus Ester oleh Alkali (diadaptasi dari Brierley dan Provost²²)

Namun mekanisme ini tidak terlalu tepat bila dihubungkan dengan zat warna dispersi yang digunakan pada penelitian ini, karena tidak memiliki gugus ester dalam strukturnya. Perubahan warna pada hasil pencelupan dengan zat warna dispersi juga dapat terjadi karena fenomena halokromisme, yaitu perubahan warna ketika berada dalam kondisi pH yang berbeda.²³⁻²⁵ Perubahan warna serat akrilat yang dicelup dalam suasana alkali pada penelitian ini dapat disebabkan oleh fenomena halokromisme, yaitu struktur zat warna mengalami konjugasi pada pH yang berbeda dan terjadi proses protonasi atau deprotonasi, seperti digambarkan pada reaksi zat warna berstruktur azo yang berubah menjadi hidrazo (Gambar 5). Dalam suasana asam, zat warna dispersi dengan kromofor azo akan mengalami protonasi pada atom nitrogen (N⁺) dan terjadi mekanisme konjugasi seperti dijelaskan oleh Griffiths dkk.²⁶ Dalam kondisi lingkungan seperti ini, zat warna tersebut memiliki ion positif atau kation. Sebaliknya, ketika pH larutan makin basa, zat warna tersebut akan terdeprotonasi, yaitu kehilangan proton.^{26,27} Protonasi dan deprotonasi pada struktur kimia zat warna menyebabkan warna berubah.^{26,27}

Adanya perubahan warna pada serat akrilat yang dicelup dengan zat warna dispersi pada kondisi

pH yang berbeda juga diamati oleh Hoten dkk.²⁵ Mereka juga menjelaskan bahwa terjadinya perubahan warna pada serat akrilat tersebut adalah karena fenomena halokromisme.

Dalam penelitian ini, hasil pencelupan pada suasana alkali (pH 8-9) terlihat lebih muda (*pale*) dibanding hasil pencelupan dalam pH 5-7. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pH pencelupan yang baik untuk mewarnai serat akrilat menggunakan zat warna dispersi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pada suasana sedikit asam, seperti pada kondisi pencelupan zat warna dispersi untuk serat poliester.



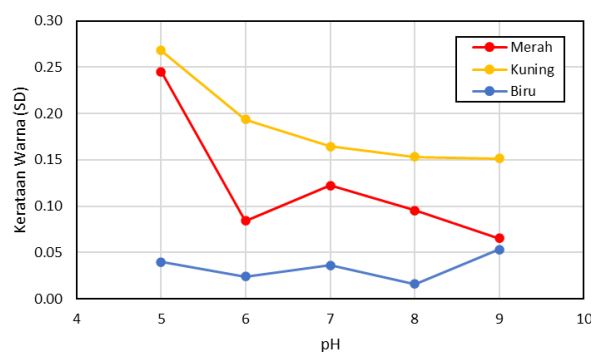
Gambar 5. Reaksi Protonasi dan Deprotonasi Zat Warna Dispersi CI *Disperse Red* 343.

Kerataan Warna

Hasil pengujian kerataan warna dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 6. Penilaian kerataan warna dilihat dari standar deviasi data hasil pengukuran K/S, artinya semakin kecil nilai standar deviasi (SD) maka kerataan warna hasil pencelupan semakin baik.

Tabel 6. Data Pengujian Kerataan Warna (Standar Deviasi) pada Berbagai Kondisi pH

Warna	Nilai Standar Deviasi				
	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9
Merah	0,25	0,08	0,12	0,10	0,07
Kuning	0,27	0,19	0,16	0,15	0,15
Biru	0,04	0,02	0,04	0,02	0,05



Gambar 6. Grafik Kerataan Warna

Hasil perhitungan standar deviasi menunjukkan bahwa untuk warna merah dan kuning, semakin tinggi pH yang digunakan, maka nilai standar deviasi cenderung semakin rendah, yang berarti kerataan semakin baik pada pH yang semakin tinggi. Sementara, untuk warna biru, terjadi fluktuasi kerataan warna dari pH 5-9. Kondisi pH yang lebih tinggi (pH 9) memberikan hasil pencelupan yang lebih rata. Hal ini dapat terjadi kemungkinan karena pada kondisi pH alkali akan lebih mudah melarutkan zat warna dispersi yang tidak terfiksasi pada permukaan serat,²⁸ sehingga menjadikan warna lebih rata dibanding dalam suasana asam. Namun secara keseluruhan, kerataan warna masih tergolong baik karena standar deviasi masih di bawah 0,3.

Ketahanan Luntur Warna terhadap Pencucian

Data hasil pengujian ketahanan luntur warna terhadap pencucian dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Ketahanan Luntur Warna Terhadap Pencucian pada Berbagai Kondisi pH

Warna	Nilai Ketahanan Luntur Warna				
	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8	pH 9
Merah	4	4	4-5	4-5	4-5
Kuning	4	4	4	4-5	4-5
Biru	4	4	4	4-5	4-5

Nilai ketahanan luntur warna terhadap pencucian benang akrilat setelah pencelupan cukup baik dengan rentang nilai sekitar 4 sampai 4-5 berdasarkan *grayscale*. Hal ini menunjukkan bahwa zat warna terfiksasi dengan baik. Dari data pengujian yang diperoleh, dapat dilihat bahwa semakin tinggi pH, ketahanan luntur warna terhadap pencucian semakin baik. Hal ini dapat terjadi karena alkali dapat membantu menghilangkan zat warna dispersi yang tidak terfiksasi pada permukaan serat seperti yang dijelaskan oleh Inoue dan Hiuke.²⁹ Berkurangnya zat warna dispersi yang tidak terfiksasi pada permukaan serat menghasilkan ketahanan luntur warna yang baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan pengujian yang telah dilakukan pada benang akrilat yang dicelup dengan zat warna dispersi (pH 5-9), maka dapat disimpulkan bahwa hasil pencelupan benang akrilat menggunakan zat warna dispersi dipengaruhi oleh kondisi pH larutan celup. Ketuaan warna hasil celup pada pH alkali lebih muda dibandingkan pada pH asam dan netral. Nilai ketuaan warna (K/S) benang akrilat berbeda tergantung kondisi pH pencelupannya, pada warna merah paling tua terdapat pada pH 7 yaitu 3,6652, pada warna kuning paling tua pada pH 7 yaitu 7,7632, dan pada warna biru paling tua pada pH 5 yaitu 1,4530. Dalam suasana alkali, hasil pencelupan benang akrilat menggunakan zat warna dispersi pada penelitian ini memberikan arah warna yang berbeda jika dibandingkan dalam suasana asam. Sampel uji memiliki ketahanan luntur warna terhadap pencucian yang baik dengan nilai 4 sampai 4-5 berdasarkan skala *greyscale*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa benang akrilat dapat dicelup menggunakan zat warna dispersi pada suasana asam (pH 5-6) dan netral (pH 7).

SARAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, perlu dipelajari lebih lanjut mengenai pengaruh pH alkali dalam pencelupan serat akrilat dengan zat warna dispersi terhadap kemungkinan terjadinya degradasi/kerusakan serat akrilat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Sdr. Andri Riswandi yang sudah mendonasikan zat warna dispersi untuk penelitian ini.

PUSTAKA

- Cox, R. Acrylic Fibres. in *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin* (ed. McIntyre, J. E.) (Woodhead Publishing Ltd., 2005).
- Needles, H. L. *Textile Fibers, Dyes, Finishes, and Processes-A Concise Guide*. (Noyes Publications, 1986).
- Knorr, B. G. and Frushour, R. S. Acrylic Fibers. in *Handbook of Fiber Chemistry* (ed. Lewin, M.) (Taylor & Francis, 2007).
- Zheng, H., Zhang, J. & Zheng, L. Optimization of an ecofriendly dyeing process in an industrialized supercritical carbon dioxide unit for acrylic fibers. *Text. Res. J.* **87**, 1818–1827 (2017).
- Houtz, R. C. "Orlon" Acrylic Fiber: Chemistry and Properties. *Text. Res. J.* **20**, 786–801 (1950).
- Britannica, T. E. of E. Polyacrylonitrile-Chemical Compound. *Britannica* <https://www.britannica.com/science/polyacrylonitrile> (2014).
- Christie, R. M. *Colour Chemistry*. (The Royal Society of Chemistry, 2001).
- Kim, H. C. The structure of acrylic, polyvinylalcohol and polyvinylchloride fibers. in *Handbook of textile fibre structure-Volume 1: Fundamentals and manufactured polymer fibres* (eds. S. J. Eichhorn, J.W.S. Hearle, M. J. and Kikutani, T.) (Woodhead Publishing Ltd., 2009).
- Broadbent, A. D. *Basic Principles of Textile Coloration*. (Society of Dyers and Colourist, 2001).
- Wardman, R. H. *An Introduction to Textile Coloration: Principles and Practice*. (John Wiley & Sons Ltd, 2018).
- Burkinshaw, S. M. *Physico-chemical Aspects of Textile Coloration*. (John Wiley & Sons Ltd, 2016).
- Koh, J. Dyeing with Disperse Dyes. in *Textile Dyeing* (ed. Hauser, P.) 195–220 (IntechOpen, 2011).
- Ingamells, W. *Colour for textiles: A user's handbook*. (Society of Dyers and Colourists, 1993).
- Kaushik, R. C. D., Deshpande, S. D. & Chavan, R. B. Dyeing of acrylic fibres with monoazo disperse dyes in presence of benzyl alcohol: Part I. *Indian J. Text. Res.* **14**, 125–129 (1989).
- Azeem, M., Fraz, A. & Javed, A. Effect of dyeing properties temperature of polyester/acrylic on the shrinkage fabric and fastness. *Pakistan J. Sci. Ind. Res. Ser. A Phys. Sci.* **61**, 100–105 (2018).
- Sunder, A. E., Chandramohan, P. & Karthik, J. A. Dyeing of acrylic fibers with reactive dyes - A practical approach. *Man-Made Text. India* **50**, 150–154 (2007).
- Salem, A. A., El-Khatib, H. S., El-Gazar, N. M. & Marie, M. M. Improving the dyeability of acrylic fabric to disperse dyes via creation of new dye-sites and formation of chemical dye-fibre bonding. in *The 5th International Conference of Chemical Industries* (2008).
- Burkinshaw, S. M. *Chemical Principles of Synthetic Fibre Dyeing*. (Springers Science & Bussiness Media, BV, 1995).
- Gao, A., Zhang, H., Hou, A. & Xie, K. Dyeing

- properties of the disperse dyes containing cyano group based on benzisothiazole for polyester fabrics under alkali condition. *Fibers Polym.* **18**, 1956–1961 (2017).
20. Koh, J. Alkali-hydrolysis kinetics of alkali-clearable azo disperse dyes containing a fluorosulphonyl group and their fastness properties on PET/cotton blends. *Dye. Pigment.* **64**, 17–23 (2005).
21. Dodangeh, M., Pajootan, E., Mohammadian, M., Allen, N. S. & Eskandari Fard, R. Alkali-clearing process optimization of the newly synthesized disperse dye and its promising removal from wastewater using electrocoagulation. *Desalin. Water Treat.* **57**, 4641–4651 (2014).
22. Brierley, D. & Provost, J. R. The Use of Disperse Dyes Containing Diester Groups to Produce Discharge Effects on Fully Dyed Lightweight Polyester Fabrics. *J. Soc. Dye. Colour.* **99**, 358–363 (1983).
23. Zhu, S. *et al.* pH-responsive cotton fibre dyed by natural madder dye. *Color. Technol.* **138**, 304–314 (2022).
24. Lams, Y. Y., Nkeonye, P. O., Bello, K. A., Yakubu, M. K. & Lawal, A. O. Synthesis of Disperse Dyes from Pyridone and Resorcinol Coupled to Diazotized 2-Amino-4-chloro-5-formylthiazole and Application to Polyester. *Adv. Chem.* **2014**, 1–7 (2014).
25. Hoten, M., Kojima, Y. & Ito, T. Halochromism of acrylic fibres dyed with some disperse dyes. *J. Soc. Dye. Colour.* **108**, 21–28 (1992).
26. Griffiths, J., Hill, J. & Fishwick, B. The Application of PPP-MO Theory to the halochromism of 4-aminoazobenzene dyes. *Dye. Pigment.* **15**, 307–317 (1991).
27. Why Do Anthocyanins Change Color. <https://learn.ddwcolor.com/why-do-anthocyanins-change-color/>.
28. *The Alkaline Dyeing on Polyester.* (Hoechst Mitsubishi Kasei Co. Ltd.).
29. Inoue, Y. & Hiuke, T. *Alkaline Dyeing of Polyester.* (1994).
-

