

Pemanfaatan Silika Dari Sekam Padi dengan Metode Sol-Gel dan Silane coupling agent NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane) Untuk Penyempurnaan Tolak Air Kain Poliester

Maya Komalasari^{1*}, Sukirman¹, Syamsiyah Nur Nadirotus¹

¹Department Textile Chemistry, Polytechnic STTT Bandung, Jl. Jakarta No. 31 West Java, 40232 Indonesia

*Email: mayakomala121@gmail.com

(Received : 4 Juli 2025; Accepted: 27 Desember 2025; Published: 1 Januari 2026)

Abstrak

Penyempurnaan sifat tolak air merupakan proses modifikasi permukaan serat kain dengan bahan kimia guna meningkatkan kemampuan kain dalam menahan penetrasi air. Resin berbasis fluorokarbon umum digunakan dalam proses ini, namun senyawa seperti PFOA dan PFOS yang dikandungnya bersifat toksik dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini mengembangkan alternatif berbahan alam berupa resin tolak air non-fluorokarbon dari silika sekam padi, yang disintesis melalui metode sol-gel dengan bantuan agen kopling silan NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane). Aplikasi resin dilakukan pada kain poliester dengan metode pad-dry-cure, menggunakan variasi pH 5, 7, dan 9. Pengujian meliputi FTIR, uji siram, sudut kontak, kekuatan tarik, kelangkaan, serta ketahanan terhadap pencucian berulang. Hasil terbaik diperoleh pada pH 5, dengan nilai uji siram awal 80 dan menurun menjadi 50 setelah lima kali pencucian. Sudut kontak mencapai 130,71° sebelum pencucian dan tetap di atas 124° setelah lima siklus pencucian, menunjukkan daya tolak air yang stabil. Kekuatan tarik mencapai 27,13 N (lusi) dan 26,60 N (pakan), sementara kelangkaan masing-masing sebesar 38,97% (depan) dan 37,88% (belakang). Hasil ini menunjukkan bahwa resin silika dari sekam padi yang dimodifikasi NXT efektif sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti fluorokarbon.

Kata kunci: silika; silane kopling agnet NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane); sol gel; pad-dry-cure; penyempurnaan tolak air

Abstract

Water-repellent finishing is a surface treatment process aimed at improving the resistance of textile fibers against water penetration by applying chemical agents. Fluorocarbon-based resins are commonly used in such applications; however, their content of hazardous substances like PFOA and PFOS raises serious health and environmental concerns. This study presents a more sustainable alternative using a non-fluorocarbon water-repellent resin synthesized from rice husk-derived silica. The resin was prepared via the sol-gel method with the addition of a silane coupling agent, NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane), and applied to polyester fabric through the pad-dry-cure method under varying pH conditions (5, 7, and 9). Comprehensive evaluations were conducted, including FTIR spectroscopy, spray test, contact angle analysis, tensile strength, surface smoothness, and repeated washing resistance. The best performance was observed at pH 5, where the fabric achieved an initial spray rating of 80, decreasing to 50 after five washing cycles. The initial contact angle of 130.71° remained above 124° after five washes, indicating sustained hydrophobicity. Tensile strength results were 27.13 N (warp) and 26.60 N (weft), with surface smoothness values of 38.97% (front) and 37.88% (back). These results confirm that rice husk-based silica resin modified with NXT is a promising eco-friendly alternative to conventional fluorocarbon finishes.

Keywords: silica, silane coupling agent NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane), sol gel, pad-dry-cure, finishing fabric water repellent

PENDAHULUAN

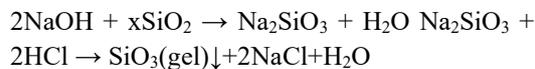
Dalam proses penyempurnaan tahan air pada kain tekstil, senyawa kimia diterapkan pada permukaan kain melalui lapisan benang untuk memperkuat ketahanan kain terhadap penetrasi air. Proses ini meliputi pelapisan kain dengan zat hidrofobik atau resin agar kain dapat menolak air dan minyak. Zat hidrofobik adalah bahan yang memiliki

sifat menolak air, sehingga air tidak mudah menyerap ke permukaan kain dan cenderung membentuk tetesan yang menggelinding. Dengan adanya lapisan resin, cairan yang menetes tidak akan membuat kain basah. Kain yang sudah diperlakukan dengan tahan air hanya akan basah jika air ditekan terus-menerus. Sementara itu, pada kain tanpa pelapisan, pori-pori antar benang memungkinkan udara dan uap air masuk, sehingga

memberikan kenyamanan saat dipakai (Mahltig et al., 2005).

Resin fluorokarbon sering digunakan untuk membuat kain poliester tahan air. Namun, resin ini dapat melepaskan zat berbahaya seperti *perfluorooctanoic acid* (PFOA) dan *perfluorooctane sulfonate* (PFOS), yang bisa merusak sistem kekebalan anak-anak, mengganggu kesuburan wanita, dan menyebabkan kanker (Bentis et al., 2017). Karena itu, resin fluorokarbon dengan rantai panjang sebaiknya dihindari dan diganti dengan resin yang bebas fluorokarbon, seperti parafin atau lilin (wax). Selain itu, sekam padi yang mengandung silika juga bisa digunakan sebagai bahan resin alternatif.

Pada penelitian ini dilakukan sintesis material berbahan alam yang mengandung silika, yang mampu memberikan sifat tolak air (Periyasamy et al., 2020) Dipilihnya silika dari sekam padi, dikarenakan sekam padi yang merupakan biomassa melimpah yang mengandung silika relatif tinggi. Proses pengambilan silika dari sekam padi dilakukan dengan metode sol gel. Penambahan asam dilakukan untuk mengekstraksi silika dari sekam padi dengan kemurnian tinggi, untuk mendapatkan silika yang lebih murni dilakukan proses acid leaching menggunakan HCl 1M (Huljana & Rodiah, 2019) Dalam proses ekstraksi, NaOH dan HCl digunakan secara stoikiometri untuk pengendapan silika, proses ini terdiri dari dua tahap yaitu pelarutan alkali dan pengendapan asam. Reaksinya sebagai berikut:



Proses sol-gel diperlukan suasana asam, apabila larutan sol-gel berada pada pH 10 maka larutan akan menjadi gel sepenuhnya dan sulit untuk larut. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses penelitian dengan memvariasikan derajat keasaman (pH) mulai dari pH asam, netral, hingga basa untuk mengetahui derajat keasaman (pH) yang optimum dalam proses pembuatan resin hasil sintesis sekam padi. (Salina Sarkawi et al., 2015) Silane coupling agent NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane) digunakan untuk memodifikasi permukaan silika secara kimia.

Pengaplikasian dilakukan pada kain poliester melalui metode *pad-dry-cure*, dengan suhu pengeringan 100°C selama tiga menit dan pemanasawetan 170°C selama lima menit. Gugus silanol (R₃Si-OH) dan kondensasi diinduksi oleh perlakuan larutan basa dengan asam hidroklorik. Hal inilah yang akan menyebabkan pembentukan jaringan Si-O-Si (Murakami et al., 2003). Pada proses sintesi tersebut pH larutan sol-gel merupakan komponen yang memengaruhi proses pembuatan resin sintesis dari sekam padi. Pada proses ini pH harus berada dalam suasana asam karena apabila pH larutan berada pada pH 10, larutan akan menjadi gel sepenuhnya dan sulit untuk larut (Ribeiro et al., 2022). Oleh karena itu,

pengaturan pH larutan pada proses sol-gel disesuaikan agar dapat larut menjadi resin tolak air. Proses sol-gel akan menyebabkan terbentuknya senyawa Si-OH (silanol), di mana gugus Si akan berikatan dengan polimer NXT silane untuk menciptakan sebuah ikatan antara anti air bahan anorganik dan organik (Neethirajan et al., 2022). Pembentukan senyawa silika (SiO₂) terjadi ketika resin sudah diaplikasikan pada kain poliester dikarenakan gugus OH teruapkan pada proses *pad-dry-cure*. (Sfameni et al., 2022). Berdasarkan hal tersebut diatas maka dilakukan karakterisasi FT-IR, uji tolak air (uji siram), uji sudut kontak, uji kekuatan tarik, uji kelangkaan kain dan uji pencucian berulang.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Sekam padi (RH) diperoleh dari sawah lokal di Bandung, Jawa Barat Indonesia. Asam klorida (HCl) kadar analitik 37%, asam sulfat (H₂SO₄) 96%, dan Natrium hidroksida (NaOH) 98% dan *Silane coupling agent* NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane), dari CV Sopyan Java Cemerlang. Kain Poliester 100 % diperoleh dari Politeknik STTT Bandung.

Metode Penelitian

Metode penelitian meliputi pembuatan sekam padi menjadi filler, dengan cara dilakukan proses ekstraksi, selanjutnya dilakukan proses silanasi dengan silan kopling agen, kemudiana proses penyempuraan menggunakan kain poliester dengan cara *pad-dry-curing* pada suhu 170°C selama 3 menit.

Proses pembuatan filler silika dari sekam padi dilanjutkan proses silanasi secara ex-situ menggunakan silan kopling agent NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane)

Bahan hibrida silika diekstraksi dari prekursor abu sekam padi (RHA), RHA dibuat dengan cara pembakaran langsung menggunakan tungku bersuhu 700⁰ C selama 6 jam, proses ekstraksi diadopsi dari laporan sebelumnya dengan beberapa modifikasi. Pertama, RHA/RH direndam dalam larutan HCl 1M dengan perbandingan 1:16 (b/v). Dilaporkan bahwa HCl 1M merupakan bahan yang paling efektif dalam menghilangkan pengotor logam pada sekam padi. Kemudian RHA/RH dipanaskan dan diaduk pada suhu 90°C selama 90 menit. Larutan disaring, dan residu dicuci dengan air sampai pH netral lalu dikeringkan pada suhu 80 °C selama 8 jam. Setelah itu, RH yang telah diberi HCl dicampur dengan larutan NaOH 2M dengan perbandingan 1:16 (b/v). Larutan dipanaskan dan diaduk pada suhu 90°C selama 4 jam lalu disaring. Larutan filtrat digunakan untuk proses pengendapan. Kemudian larutan H₂SO₄ 2M ditambahkan tetes demi tetes ke dalam larutan filtrat pada suhu kamar hingga tercapai pH 5,7, dan 9. Filtrat yang terbentuk kemudian didiamkan selama 8

jam dan di keringkan, sampai terbentuk serbuk putih dari silika.

Selanjutnya adalah proses silanasi yang dikerjakan secara *ex-situ*, filler silika ditimbang sebanyak 6% dan dicampurkan dengan *silane coupling agent NXT (3-Octanoylthio-1-propyltriethoxysilane)* dengan perbandingan (1:10) menggunakan pelarut toluene, dipanaskan pada suhu 80°C selama 2 jam, selanjutnya di cuci dan bilas menggunakan larutan ethanol 98%. Kemudian di kerinagan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 12 jam. Serbuk putih silika tersilanasi dengan variasi pH 5,7 dan 9 selanjutnya di lakukan proses penyempurnaan dengan cara *pad-dry-cure* pada kain poliester pada temperatur 170°C selama 3 menit.

Karakterisasi dilakukan pada silika dan silika hasil silanasi untuk mengonfirmasi terbentuknya gugus Si-O-Si. Konfirmasi tersebut diperoleh melalui analisis FTIR pada kain poliester. Selanjutnya, karakterisasi menggunakan analisis sudut kontak dilakukan untuk mengukur kemampuan tolak air dari penambahan resin hasil sintesis. Selain itu, dilakukan pula karakterisasi pada bahan tekstil berupa pengujian kekuatan tarik dan tingkat kelangsain kain.

Karakterisasi Silika Silanasi NXT dengan variasi pH dan Aplikasi pada kain Poliester

Karakterisasi spektroskopi FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi silika silanasi NXT variasi pH 5,7 dan 9. FTIR-ATR digunakan di Politeknik STTT Bandung, Indonesia. Sampel dimasukkan ke dalam tempat sampel dan disinari sinar infra merah pada kisaran 400–4500 cm^{-1} . Aplikasi untuk pengujian pada kain poliester yaitu Pengujian uji tolak air (uji siram) (ISO 4920:2012), uji sudut kontak, uji kekuatan tarik (SNI 0276-2009), uji kelangsain kain (SNI 08-1511-2004) dan uji pencucian berulang (SNI 0298-2009).

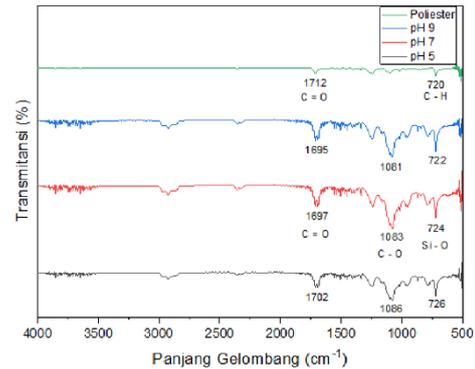
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Silika silanasi dengan variasi pH pada kain poliester berdasarkan Analisa FTIR

Pengujian FTIR (Fourier Transformed Infrared) dilakukan menggunakan alat spektroskopi. Pengujian dilakukan pada kain poliester tanpa variasi pH, kain poliester dengan silika silanasi NXT dengan variasi pH 5,7, dan 9. Gugus fungsi pada kain poliester tersebut dapat dikelompokkan menggunakan spektroskopi. Hubungan antara %T, atau transmisi, dengan bilangan gelombang (cm^{-1}) ditunjukkan dalam grafik hasil pengujian FTIR.

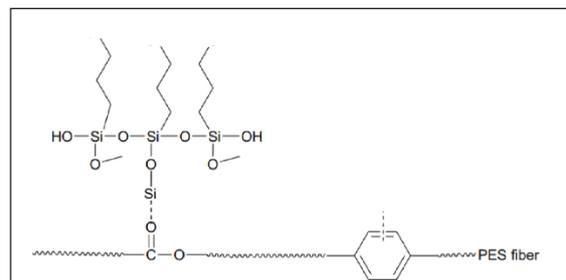
Perbedaan nilai bilangan gelombang yang kecil antara pH 5, pH 7, dan pH 9 menunjukkan bahwa pH memengaruhi tingkat interaksi dan pembentukan ikatan gugus fungsi. Penurunan nilai bilangan gelombang menunjukkan bahwa semakin basa kondisi (pH 9), semakin kuat atau lebih banyak interaksi yang terbentuk. Hal ini bisa disebabkan oleh efisiensi reaksi kondensasi antara gugus silanol dan permukaan kain yang lebih tinggi pada pH netral

hingga basa ringan. Proses *sol-gel* yang digunakan untuk mensintesis resin silika dari sekam padi berperan penting dalam modifikasi ini. Dalam proses ini, senyawa silan seperti tri-octanoylthio-monopropyltriethoxysilane (NXT) mengalami hidrolisis membentuk gugus silanol (Si-OH), yang kemudian mengalami reaksi kondensasi membentuk ikatan siloksan (Si-O-Si). Gugus ini dapat berikatan dengan permukaan kain polyester seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 menghasilkan lapisan berbasis silika yang meningkatkan sifat tolak air.



Gambar 1. Spektrum FTIR Silika variasi pH Pada Kain poliester

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Huljana & Rodiah (2019), yang menunjukkan bahwa kain yang dimodifikasi dengan metode *sol-gel* memiliki peningkatan signifikan dalam sifat hidrofobik, yang dapat diverifikasi melalui bentuk tetesan air. Namun, sebagaimana disebutkan oleh Periyasamy et al. (2020), hal yang perlu diperhatikan yaitu kontrol ukuran partikel hasil sintesis, karena partikel yang terlalu besar dapat mengganggu struktur matriks kain, menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat distribusi beban yang tidak merata.



Gambar 2. Mekanisme Ikatan antarmolekul silika silan dan serat poliester (Boukhriss et al., 2015)

Pengujian Sudut Kontak

Pengujian sudut kontak dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas resin tolak air hasil sintesis dari sekam padi dalam membentuk permukaan hidrofobik pada kain poliester. Sudut kontak adalah

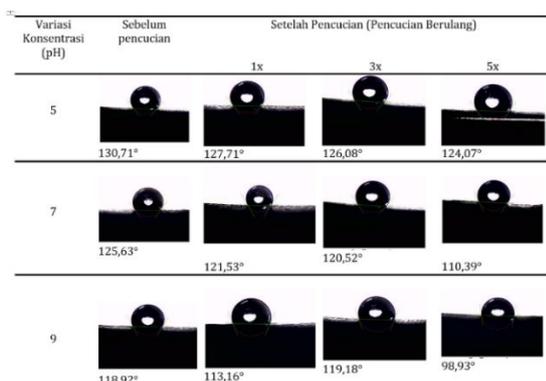
parameter yang menunjukkan sejauh mana cairan (dalam hal ini air) dapat membasahi permukaan padat. Umumnya, sudut kontak lebih kecil dari 90° mengindikasikan permukaan hidrofilik, sedangkan sudut kontak lebih besar dari 90° menunjukkan permukaan hidrofobik. Semakin besar nilai sudut kontak, semakin rendah daya serap terhadap air, dan semakin baik performa tolak airnya.

Berdasarkan Tabel 1, diketahui bahwa semua perlakuan menghasilkan sudut kontak di atas 90°, yang menunjukkan bahwa resin silika dari sekam padi secara efektif membentuk lapisan tolak air di permukaan kain poliester. Di antara ketiga variasi pH yang diuji (pH 5, 7, dan 9), perlakuan pada pH 5 memberikan hasil terbaik, dengan nilai sudut kontak awal sebesar 130,71°, yang menurun secara bertahap menjadi 124,07° setelah lima siklus pencucian. Nilai ini masih berada di atas 120°, menunjukkan bahwa lapisan tolak air tetap stabil meskipun telah mengalami pencucian berulang. Sebaliknya, pada variasi pH 9, sudut kontak awal lebih rendah (118,92°) dan mengalami penurunan drastis hingga mencapai 98,93° setelah lima siklus pencucian. Hal ini menunjukkan bahwa resin yang disintesis pada pH tinggi menghasilkan lapisan yang kurang stabil secara adhesi terhadap serat kain, kemungkinan karena reaksi kondensasi silanol yang terlalu cepat menyebabkan terbentuknya partikel silika berukuran besar yang tidak melekat kuat pada substrat (kain poliester).

Tabel 1. Pengaruh pH terhadap siklus pencucian

Variasi pH	Sebelum pencucian	Siklus pencucian ke-		
		1	3	5
pH 5	130,71°	127,71°	126,08°	124,07°
pH 7	125,63°	121,53°	120,52°	119,18°
pH 9	118,92°	113,16°	110,39°	98,93°

Tabel 2. Visual hasil pengujian sudut kontak pada kain poliester



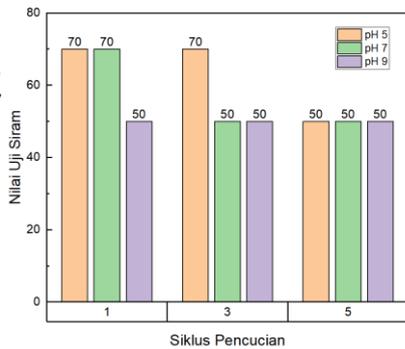
Pengujian Siram

Hasil pengujian uji siram sebelum pencucian berulang yang didapatkan pada kain dengan resin hasil sintesis sekam padi pada pH 5 mendapatkan nilai rata-rata 80, pada pH 7 mendapatkan nilai rata-rata 70 dan pada pH 9 mendapatkan nilai rata-rata 50, sedangkan resin komersil (texaguard) memiliki nilai rata-rata 90. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin asam tingkat derajat keasaman (pH), maka nilai uji siram semakin tinggi. Hal ini terjadi karena pada proses sol-gel diperlukan suasana asam, apabila larutan sol-gel berada pada pH 10 maka larutan akan menjadi gel sepenuhnya dan sulit untuk larut sehingga derajat keasaman dapat mempengaruhi resin hasil sintesis sekam padi. Setelah pencucian berulang terjadi penurunan nilai uji siram, hasilnya terdapat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh pH terhadap siklus pencucian

Variasi pH	Sebelum pencucian	Siklus pencucian ke-		
		1	3	5
pH 5	80	70	70	50
pH 7	70	70	50	50
pH 9	70	50	50	50

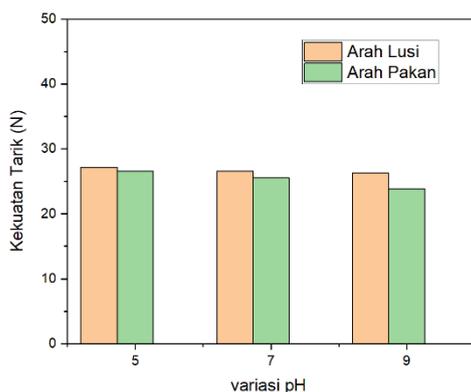
Adanya penurunan nilai daya tolak air tersebut dapat disebabkan karena ikatan yang terbentuk antara silika yang terkandung dalam resin tolak air hasil sintesis dari sekam padi dengan kain poliester memiliki ikatan van der Waals, di mana ikatan tersebut merupakan ikatan antar molekul yang bersifat lemah. Larutan sol-gel yang telah dilakukan proses silanasi dengan menambahkan NXT sebagai zat coupling agent menghasilkan gugus aktif siloksan (Si-O-Si) dan gugus aktif silanol (Si-OH). Gugus -OH yang terbentuk dari gugus aktif silanol (Si-OH) mampu berikatan dengan gugus ester pada kain poliester C=O, namun ikatan yang terbentuk merupakan ikatan van der Waals yang bersifat lemah. Hal ini yang menyebabkan saat dilakukan pencucian berulang nilai uji siram mengalami penurunan. Selain itu, pada saat pencucian berulang kain mengalami gesekan mekanik yang menyebabkan retakan pada lapisan film resin hasil sintesis sekam padi yang terbentuk pada permukaan kain sehingga air dapat berpenetrasi ke dalam kain.



Gambar 3 Hasil Pengujian Uji Siram dan Pencucian Berulang

Pengujian Kekuatan Tarik Kain

Berdasarkan grafik di atas nilai kekuatan tarik pada kain poliester yang telah dilakukan proses penyempurnaan tolak air menunjukkan bahwa semakin alkali tingkat derajat keasaman (pH), maka semakin menurun nilai kekuatan tarik. Hal tersebut terjadi karena penggunaan NaOH dalam proses alkalisasi dapat mengikis serat pada kain poliester.



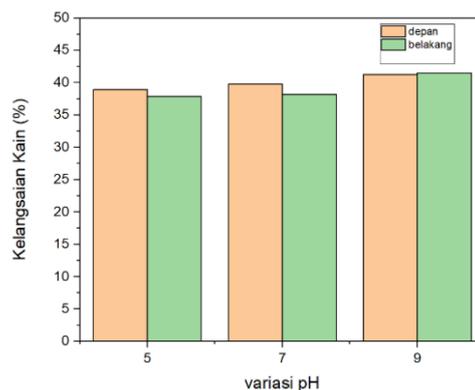
Gambar 4 Hasil Pengujian Uji Kekuatan tarik kain

Penurunan kekuatan tarik ini dikarenakan oleh sifat kimia dari serat poliester yang tidak tahan terhadap alkali kuat dapat menyebabkan serat terdegradasi dan menyebabkan kekuatan tarik menurun.

Pengujian Kelangsain kain

Berdasarkan Gambar 5, nilai pengujian kelangsain pada kain poliester yang telah dilakukan proses penyempurnaan tolak air menunjukkan bahwa semakin asam derajat keasaman (pH), maka persentase nilai kelangsain semakin kecil yang menandakan bahwa kain tersebut semakin langkai. Hasil pengujian kelangsain pada variasi pH 5 yaitu 38,97% pada bagian muka dan 37,88% pada bagian belakang, pada variasi pH 7 yaitu 39,77% pada bagian

muka dan 38,20% pada bagian belakang, dan pada variasi pH 9 yaitu 41,26% pada bagian muka dan 41,22% pada bagian belakang. Hal ini terjadi disebabkan karena apabila resin tolak air hasil sintesis sekam padi mengandung pH alkali maka larutan resin tersebut menjadi gel sepenuhnya dan sulit untuk larut sehingga mempengaruhi kenampakan kain. Dari hasil pengujian kelangsain dapat disimpulkan bahwa variasi pH 5 menunjukkan persentase nilai kelangsain yang lebih kecil artinya nilai kelangsain lebih baik.



Gambar 5. Hasil Uji Kelangsain kain

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa derajat keasaman (pH) berpengaruh signifikan terhadap efektivitas proses penyempurnaan sifat tolak air pada kain poliester menggunakan resin berbasis silika dari sekam padi yang dimodifikasi dengan agen kopling NXT. Variasi pH memberikan dampak terhadap hasil uji FTIR, nilai uji siram, sudut kontak, kekuatan tarik, kelangsain, serta ketahanan terhadap pencucian berulang. Semakin asam kondisi pH, terutama pada pH 5, menunjukkan kinerja terbaik dalam meningkatkan sifat hidrofobik dan mekanik kain. Pada kondisi optimum pH 5, nilai uji siram mencapai rata-rata 80 sebelum pencucian dan menurun secara bertahap menjadi 50 setelah lima kali pencucian. Sudut kontak tetap stabil di atas 124° setelah pencucian berulang, menunjukkan daya tolak air yang baik. Selain itu, kekuatan tarik mencapai 271,13 N (lusi) dan 264,60 N (pakan), serta kelangsain sebesar 38,97% pada sisi muka dan 37,88% pada sisi belakang kain. Dengan demikian, resin silika hasil sintesis dari sekam padi yang dikombinasikan dengan NXT dapat dijadikan alternatif pengganti resin fluorokarbon dalam aplikasi penyempurnaan tolak air pada kain poliester.

DAFTAR PUSTAKA

Bentis, A., Boukhriss, A., Boyer, D., & Gmouh, S. (2017). Development of flame retardant cotton

- fabric based on ionic liquids via sol-gel technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(12). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/12/122001>
- Boukhriss, A., Boyer, D., Hannache, H., Roblin, J. P., Mahiou, R., Cherkaoui, O., Therias, S., & Gmouh, S. (2015). Sol-gel based water repellent coatings for textiles. *Cellulose*, 22(2), 1415–1425. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0565-7>
- Hidayati, E. L., & Komalasari, M. (2020). Penyempurnaan Dengan Menggunakan Senyawa Fluorokarbon Pada Kain Poliester Microfiber Terhadap Sifat Tolak Air, Kekuatan Tarik Dan Kekakuan Kain. *Texere*, 16(1), 8–18. <https://doi.org/10.53298/texere.v16i1.2>
- Huljana, M., & Rodiah, S. (2019). Sintesis Silika dari Abu Sekam Padi dengan Metode Sol-gel. *Sains dan Teknologi Terapan*, 2, 1–8.
- Mahltig, B., Haufe, H., & Böttcher, H. (2005). Functionalisation of textiles by inorganic sol-gel coatings. *Journal of Materials Chemistry*, 15(41), 4385–4398. <https://doi.org/10.1039/b505177k>
- Murakami, K., Ilo, S., Ikeda, Y., Ito, H., Tosaka, M., & Kohjiya, S. (2003). Effect of silane-coupling agent on natural rubber filled with silica generated in situ. *Journal of Materials Science*, 38(7), 1447–1455. <https://doi.org/10.1023/A:1022908211748>
- Neethirajan, J., Parathodika, A. R., Hu, G.-H., & Naskar, K. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art. *Functional Composite Materials*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s42252-022-00035-7>
- Periyasamy, A. P., Venkataraman, M., Kremenakova, D., Militky, J., & Zhou, Y. (2020). Progress in sol-gel technology for the coatings of fabrics. *Materials*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/MA13081838>
- Ribeiro, G. D., Hiranobe, C. T., da Silva, J. F. R., Torres, G. B., Paim, L. L., Job, A. E., Cabrera, F. C., & dos Santos, R. J. (2022). Physical-Mechanical Properties of Chartwell® Coupling Agent-Treated Calcium Carbonate and Silica-Reinforced Hybrid Natural Rubber Composites. *Crystals*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/cryst12111552>
- Salina Sarkawi, S., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. M. (2015). Morphology of silica-reinforced natural rubber: The effect of silane coupling agent. *Rubber Chemistry and Technology*, 88(3), 359–372. <https://doi.org/10.5254/rct.15.86936>
- Sfamemi, S., Lawnick, T., Rando, G., Visco, A., Textor, T., & Plutino, M. R. (2022). Functional Silane-Based Nanohybrid Materials for the Development of Hydrophobic and Water-Based Stain Resistant Cotton Fabrics Coatings. *Nanomaterials*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/nano12193404>