

## **PENGARUH PERBEDAAN WAKTU PENYAMAKAN NABATI TERHADAP KARAKTERISTIK KULIT TERSAMAK YANG DIHASILKAN**

*The Effect of Different Tanning Times Used Vegetable Tannin Agent on the  
Characteristics of Leather Produced*

Sri Mutiar<sup>1\*</sup>, Lisa Yusmita<sup>1</sup> dan Anwar Kasim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Dharma Andalas, Padang

<sup>2</sup>Departemen Teknologi Industri Pertanian, Universitas Andalas, Padang

\* Email: [srmutiar@unidha.ac.id](mailto:srmutiar@unidha.ac.id)

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2023.4.2.9997>

Naskah ini diterima pada 11 Oktober 2023; revisi pada 16 Oktober 2023;  
disetujui untuk dipublikasikan pada 14 November 2023

### **ABSTRAK**

*Lead time* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghilangkan aktivitas-aktivitas yang tidak memberikan nilai tambah pada suatu proses produksi. Proses penyamakan kulit pada umumnya merupakan rangkaian proses yang sangat panjang dengan jumlah bahan kimia yang sangat banyak. Proses penyamakan pada umumnya dimulai dari kulit mentah, buang bulu, buang lemah, netralisasi, pikel, penyamakan mineral, penyamakan nabati, penyamakan ulang, dan finisihing. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu penyamakan terhadap karakteristik kulit tersamak yang dihasilkan. Bahan yang digunakan dalam percobaan ini menggunakan kulit kambing. Percobaan penyamakan kulit dengan berbagai waktu penyamakan 3 jam, 6 jam, 12 jam dan 24 jam. bahan penyamak mimosa, quebraco dan ekstrak kulit kayu Acacia mangium melalui penyamakan tunggal. Analisis kualitas kulit tersamak ditentukan dari karakteristik kulit tersamak secara kimia, pengukuran sifat fisik dan organoleptis kulit tersamak. Analisis data menggunakan T test untuk melihat pengaruh perbedaan waktu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk menghasilkan kulit kambing tersamak yang memenuhi standar penggunaan waktu penyamakan  $\geq 12$  jam.

Kata Kunci: waktu, proses penyamakan kulit, karakteristik kulit tersamak

### **ABSTRACT**

*Lead time* is one of the methods used to eliminate activities that do not add value to a production process. The leather tanning process is generally a very long series of processes with many series of processes of chemicals. The tanning process generally starts with rawhide, hair removal, weak removal, neutralization, pickle, tanning, re-tanning, and finishing. The purpose of this study was to determine the effect of tanning time on the characteristics of leather produced. The material used in this experiment was goat skin. Tanning experiments with various tanning times of 3 hours, 6 hours, 12 hours and 24 hours. mimosa, quebracho and Acacia mangium bark extract through single tanning. Analysis of leather quality was determined from chemical characteristics of leather, measurement of physical and organoleptic properties of leather. Data analysis used T test to see the effect of time difference. The results showed that to produce tanning of leather that the standard, the tanning time  $\geq 12$  hours was used.

Keywords: time, tanning process, characteristics of leather

## PENDAHULUAN

Penyamakan kulit merupakan serangkaian proses untuk mengubah keadaan kulit hewan mentah yang tidak tahan terhadap jamur, bakteri, mikroorganisme, bahan kimia, dan panas, menjadi lebih stabil dan tahan terhadap sejumlah kondisi yang berpotensi menimbulkan kerusakan. Penelitian tentang penyamakan kulit masih banyak dilakukan pada saat ini diantara seperti Suparno (2005) penyamakan kulit domba dengan menggunakan bahan penyamak ramah lingkungan berupa bahan penyamak mimosa, naftol dan oksazolidin; Haroun *et al.*, (2008) tentang penyamakan kulit kombinasi menggunakan bahan penyamak nabati dan aluminium; Rema *et al.*, (2010) penyamakan nabati dengan menggunakan syntan ; Falcão and Araújo, (2013) tentang penentuan karakteristik tanin sebagai bahan penyamak dari berbagai tanaman; Boissiere *et al.*, (2013) tentang karakteristik kulit tersamak dengan menggunakan bahan penyamak nabati; Maier *et al.*, (2017) tentang potensi berbagai tanaman untuk bahan penyamak kulit. Kualitas kulit tersamak dipengaruhi oleh kualitas serta jenis dari kulit yang digunakan.

Di industri penyamakan kulit saat ini penyamak nabati yang digunakan berbentuk bubuk yaitu Mimosa dan Quebraco. Kedua jenis bahan penyamak tersebut merupakan produk impor. Menurut Kasim *et al.*, (2015) menyatakan bahwa penyamak nabati bersumber dari tanaman yang dapat digunakan secara langsung atau diekstrak terlebih dahulu. Beberapa penelitian tentang ekstrak tanin dari tanaman sebagai bahan penyamak kulit diantaranya (Haroun *et al.*, 2013) melakukan penyamakan kombinasi dengan menggunakan bahan penyamak kulit kayu *Acacia nilotica* (Garad) dan Aluminium. Herminiwati *et al.*, (2015) menjelaskan, bahan penyamak tersebut terdiri dari senyawa tanin (bahan penyamak), non tanin dan senyawa tidak larut air lainnya. Mutiar *et al.* (2023) tentang potensi ekstrak kulit kayu *Acacia* dari Hutan tanaman Industri sebagai bahan baku penyamakan kulit.

Di Sumatera Barat berdasarkan survei terdapat lebih kurang 150 rumah makan khas masakan berbahan daging kambing dengan rata-rata pemotongan kambing 2-5 ekor/hari. Kulit kambing berasal dari restoran, rumah potong hewan dan limbah kulit ternak pada hari raya kurban Untuk menjaga kondisi kulit tidak busuk, kulit kambing diawetkan dengan pemberian garam.

Proses penyamakan pada umumnya terdiri dari persiapan kulit mentah menjadi kulit pikel, proses pereaksian bahan penyamak dengan kulit dan finishing kulit. Menurut Kasim *et al.*, (2013) proses penyamakan kulit kambing dapat dilakukan dengan penyamakan tunggal dan penyamakan kombinasi. Penyamakan tunggal merupakan penyamakan kulit dengan satu jenis bahan penyamak, misalnya dengan bahan penyamak nabati, Proses penyamakan yang dapat disiapkan dalam waktu lebih kurang 1-2 minggu atau lebih.

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis rangkaian proses penyamakan kulit dengan cara mengurangi rangakai proses pengolahan kulit menjadi lebih singkat dan sederhana, tanpa mengurangi kualitas kulit yang dihasil terutama. Untuk mengukur karakteristik kulit tersamak yang dihasilkan mengacu kepada standar SNI kulit tersamak.

## METODE PENELITIAN

### Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kulit kambing awet garam, mimosa, quebraco, ekstrak kulit kayu Acacia mangium, kapur, natrium sulfida, asam sulfat, natrium karbonat, natrium bikarbonat, asam formiat, natrium hidroksida, asam sulfat, teepol, preventol, hexana dan indikator MMB.

### Pelaksanaan Penelitian

Prosedur kerja penyamakan dilakukan berdasarkan modifikasi dari metode UPTD Pengolahan Kulit Kota Padang Panjang:

### Persiapan kulit untuk disamak

1. Perendaman kulit kering.
2. Pengapuran. Kulit yang telah direndam di masukkan kedalam drum penyamakan, ditambahkan air sebanyak 200%, kapur 6% dan natrium sulfida 4% kemudian diputar di dalam drum penyamakan selama 2 jam. Persentase dihitung berdasarkan berat kulit basah.
3. Pembuangan bulu dan lemak. Kulit dicuci satu kali untuk membersihkan sisa bulu yang menempel pada kulit. Selanjutnya lemak pada kulit di buang dengan menggunakan pisau setes sampai tidak ada lagi bagian lemak yang terdapat pada kulit.
4. Penimbangan bloten (berat kulit setelah pembuangan bulu dan lemak).
5. Pembuang kapur. Kulit di masukkan kedalam drum penyamakan, ditambahkan air sebanyak 100% dan 0,5% amonium sulfat setelah itu diikuti dengan pemutaran drum selama 30 menit. Setelah itu ditambahkan asam formiat sebanyak 0,5% dan diputar lagi 30 menit. Persentase dihitung berdasarkan berat bloten.
6. Pengikisan protein. Kulit dan larutan setelah proses pembuangan kapur ditambahkan teepol sebanyak 0,5% dan 0,5% oropon lalu diikuti pemutaran drum penyamakan selama 30 menit. Setelah itu kulit dicuci sampai bersih.
7. Pengasaman. Kulit di masukkan kedalam drum penyamakan, ditambahkan air sebanyak 80% dan 10% garam yang diikuti dengan pemutaran drum penyamakan selama 10 menit. Setelah itu ditambahkan asam formiat sebanyak 0,5% dan diputar lagi selama 30 menit. Kemudian ditambahkan asam sulfat sebanyak 1,5% yang dilarutkan dengan air perbandingan 1 : 10 lalu diikuti dengan pemutaran drum penyamakan selama 30 menit. Setelah itu ditambahkan proventol sebanyak 0.01% dan diikuti dengan pemutaran selama 10 menit.
8. Kulit dimasukkan kedalam drum penyamakan kemudian ditambahkan air sebanyak 100% dan 20% bahan penyamaka nabati yang terdiri dari mimosa, quebraco dan ekstrak kulit kayu Acacia mangium. selanjutnya kulit disamak dengan waktu penyamakan yaitu 3 jam, 6 jam, 12 jam dan 24 jam dengan konsentrasi masing-masing bahan penyamakan kulit sebanyak 20% dari berat pikel.
9. Pencucian. Kulit dicuci bersih dari zat penyamak yang masih melekat.
10. Pementangan dan pengeringan kulit.

### Pengamatan Kulit Tersamak

Pengamatan dilakukan terhadap karakteristik kulit tersamak meliputi sifat kimia, sifat fisis dan pengamatan visual keadaan kulit tersamak.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### **Analisis Kimia Kulit Tersamak**

Hasil analisis kimia kulit tersamak disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan waktu pada proses penyamakan kulit menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata pada waktu penyamakan 3 jam dan 6 jam untuk bahan penyamak mimosa, quebraco dan ekstrak kulit kayu *A.mangium*. Namun menunjukkan hasil yang berbeda nyata terhadap perlakuan penyamakan 12 jam dan 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses penyamakan kurang dari 12 jam menghasilkan kulit samak yang belum sempurna. Menurut Ibrahim *et al.* (2005) bahwa penyamakan yang sempurna adalah berdifusinya zat penyamak ke dalam kulit melalui permukaan rajah kulit dan berikatan dengan komponen penyusun kulit serta mengisi ruang kosong diantara serat-serat kulit.

Hasil analisis statistik uji T menunjukkan bahwa menggunakan mimosa, quebraco dan ekstrak kulit kayu *A.mangium* pada waktu penyamakan yang berbeda menunjukkan pengaruh yang berbeda nyata pada perlakuan penyamakan 12 jam. Sedangkan pada perlakuan 3 jam dan 6 jam menunjukkan hasil yang sama. Kadar tanin terikat kulit tersamak dengan lama penyamakan 3 jam untuk ketiga jenis bahan penyamak menunjukkan hasil yang belum memenuhi standar minimal 25%. Hal ini menunjukkan bahwa waktu penyamakan 3 jam dan 6 jam tidak disarankan untuk digunakan. Berdasarkan waktu proses penyamakan yang disarankan adalah besar dari 12 jam untuk memperoleh hasil penyamakan yang memenuhi standar. Berdasarkan uji suhu kerut penyamakan dalam waktu 3 jam dan 6 jam tidak disarankan untuk dilakukan karena suhu kerut yang rendah.

Nilai kekuatan tarik kulit tersamak mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan lama waktu proses penyamakan mulai dari 3 jam, 6 jam dan 12 jam (Tabel 2). Nilai ini berbanding terbalik dengan kemuluran kulit tersamak yang peningkatan seiring dengan lama proses penyamakan. Kulit tersamak dengan bahan penyamak ekstrak *A.auriculiformis* memiliki density lebih rendah dibandingkan density kulit tersamak dengan bahan penyamak ekstrak *A.mangium*. Kelemasan kulit yang disamak 3 jam dan 6 jam untuk kedua jenis penyamak menghasilkan kulit yang kaku. Sedangkan kulit yang disamak selama 12 jam menghasilkan kulit samak yang cukup lemas. Menurut Herminiwati *et al.*, (2015) nilai karakteristik kimia dan fisik kulit tersamak terutama derajat penyamakan merupakan indikator banyaknya tanin yang masuk/terikat pada kulit sehingga menjadi masak untuk menghasilkan kulit yang berkekuatan tarik dan kemuluran yang sesuai standar, berisi serta lemas/fleksibel. Jika kulit tidak masak, kulit tersamak yang dihasilkan akan tetap kaku walau diberi minyak karena minyak tidak bisa masuk.

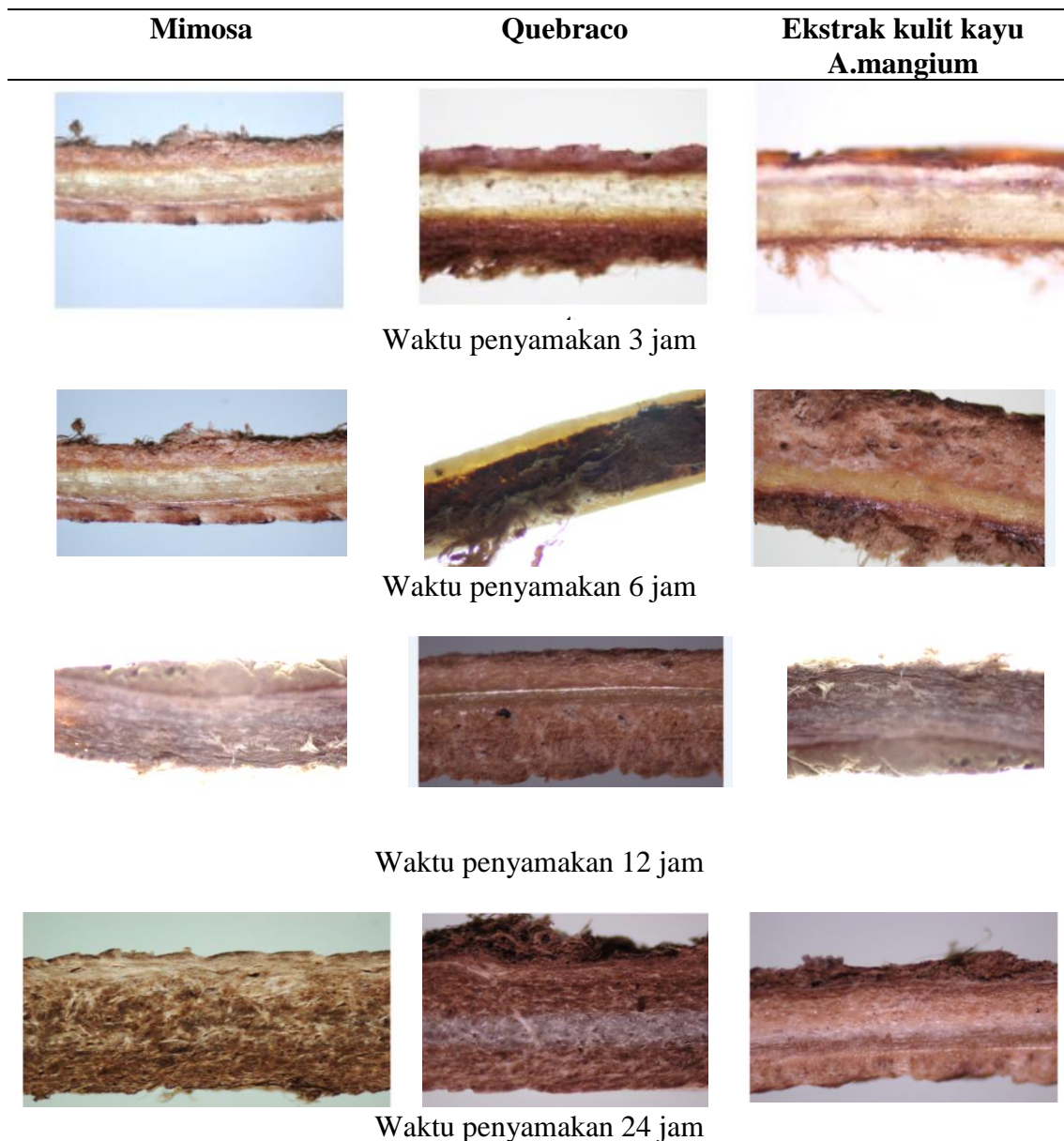
Berdasarkan waktu penyamakan pada pengamatan mikroskopis kulit tersamak berdasarkan perbedaan waktu samak menggunakan bahan penyamak mimosa, quebraco dan ekstrak *A.mangium* terlihat perbedaan (Gambar 1). Kulit tersamak dengan kedua bahan penyamak menunjukkan serat kulit yang rapat pada penyamakan waktu 3 jam dan 6 jam karena kulit belum tersamak sempurna. Pada waktu penyamakan 12 jam dan 24 jam menghasilkan kulit tersamak yang berisi. Kulit tersamak dengan waktu lebih dari 12 jam memiliki serat kulit yang lebih baik tersamaknya.

Tabel 1. Analisis kimia kulit tersamak berdasarkan perbedaan waktu penyamakan dengan bahan penyamak nabati yang berbeda

Waktu penyamakan	Mimosa			Quebraco			Ektrak kulit kayu Acacia mangium		
	Kadar tanin terikat(%)	Derajat penyamakan (%)	Suhu kerut (C <sup>0</sup> )	Kadar tanin terikat(%)	Derajat penyamakan(%)	Suhu kerut (C <sup>0</sup> )	Kadar tanin terikat(%)	Derajat penyamakan (%)	Suhu kerut (C <sup>0</sup> )
3 jam	25,65	50,78	60	25,87	50,45	60	22,57	42,12	64
6 jam	37, 56	89,57	63	32,89	78,6	63	36,06	83,35	64
12 jam	52,31	91,45	73	50,89	89,34	72	39,81	108,41	82
24 jam	45,58	167,63	88	45,80	162,37	87	41,41	91,82	83
SNI	-	Min. 25	Min 70	-	Min. 25	Min 70	-	Min. 25	Min 70

Tabel 2. Analisis fisik kulit tersamak berdasarkan perbedaan waktu penyamakan dengan bahan penyamak nabati yang berbeda

Waktu penyamakan	Mimosa		Quebraco		Ektrak kulit kayu Acacia mangium	
	Kekuatan Tarik	Kemuluran (%)	Kekuatan Tarik	Kemuluran (%)	Kekuatan Tarik	Kemuluran (%)
3 jam	2963,66	34,62	3897,91	37,40	5763,46	35,00
6 jam	2927,81	54,21	3878,42	37,32	4995,02	34,94
12 jam	2313,48	64,92	2186,16	58,26	3209,42	62,86
24 jam	2396,76	26,02	1728,36	58,92	2103,57	58,26
SNI	Min.1000	Mak. 70	Min.1000	Mak. 70	Min.1000	Mak. 70



**Gambar 1.** Hasil pengamatan mikroskopis kulit tersamak (40x perbesaran) pada waktu samak yang berbeda dengan bahan penyamak (a) Mimosa (b) Quebraco (c) Ekstrak A. mangium dengan waktu penyamakan 3 jam, 6 jam, 12 jam dan 24 jam.

Karakteristik kulit tersamak dengan menggunakan quebraco dan mimosa merupakan bahan penyamak yang umum digunakan di industry penyamakan kulit serta menjadi pembandingan dari penggunaan bahan penyamak ekstrak kulit kayu Acacia yang digunakan. Beberapa pendapat penggunaan bahan penyamak yang berbeda diantaranya: Kusmaryanti, *et al.*, (2016) perbedaan bahan penyamak yang digunakan berpengaruh nyata terhadap kekuatan tarik dan ketebalan kulit. Asrida (2008) penggunaan bahan penyamak aldehyd seperti formalin menghasikan kulit tersamak yang lebih padat. Purnomo (2001) menambahkan kulit yang disamak dengan formalin, mempunyai ketahanan panas lebih kurang 80°C sementara kulit yang samak dengan khrom lebih menghasilkan kulit yang kuat. Menurut Shi *et al.*, (2016) sifat bahan penyamak mimosa

mudah larut dalam air, memiliki daya samak yang baik, dapat digunakan untuk semua macam jenis kulit, menghasilkan kulit yang lebih padat, ramah lingkungan dan memiliki kekuatan tarik kulit yang tinggi. Berdasarkan berbagai pendapat tersebut diatas menunjukkan bahwa bahan penyamak yang digunakan menghasilkan karakteristik tersendiri terhadap kulit tersamak yang dihasilkan. Demikian juga halnya dengan kulit tersamak yang dihasilkan dengan menggunakan ekstrak kulit kayu pada penelitian ini. Hal ini menjadi satu faktor penting dalam penyamakan kulit adalah bahan penyamak kulit (*tanning agent*) yang digunakan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan karakteristik kimia dan fisik kulit tersamak dapat diambil kesimpulan bahwa waktu penyamakan yang disarankan adalah lebih dari 12 jam untuk menghasilkan karakteristik kulit yang memenuhi standar SNI.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Dharma Andalas, yang telah membantu dalam pendanaan dari penelitian ini. UPTD Pengolahan Kulit Kota Padang Panjang. Yang telah membantu dalam proses penelitian. Terima kasih juga kepada mahasiswa Revi Julian yang telah membantu dalam penelitian ini

## DAFTAR PUSTAKA

- Boissiere, M., Garde, V.L., Izquierdo, E., Boissi, M., Robinet, L., (2013). Characterization Of The Effect Of Heat Characterization Of The Effect Of Heat On Vegetable Tanned Leather.
- Carçote, C., Badea, E., Miu, L., Gatta, G. Della, (2016). Study of the effect of tannins and animal species on the thermal stability of vegetable leather by differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 124, 1255–1266. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5344-7>
- Grasel, F. dos S., Ferrão, M.F., Wolf, C.R., (2016). Ultraviolet spectroscopy and chemometrics for the identification of vegetable tannins. *Industrial Crops and Products* 91, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.022>
- Haroun, M., Khirstova, P., Abdallah, G., Tony, C., (2008). Vegetable and aluminium combination tannage: aboon alternative to chromium in the leather industry. *Suranaree journal of science and technology* 15, 123–132.
- Herminiwati, H., Waskito, S., Purwanti, C.M.H., Prayitno, P., Ningsih, D., 2015a. Pembuatan bahan penyamak nano nabati dan aplikasinya dalam penyamakan kulit. *MKKP* 31, 15. <https://doi.org/10.20543/mkcp.v31i1.180>
- Ibrahim, L., juliarsi, I., Melya, S., 2005. Ilmu dan Teknologi Pengolahan Kulit. Fakultas Peternakan Universitas Andalas, Padang.
- Iriany, Pandiangan, Eka, &, 2017. Extraction of tanin from Acacia bark using microwave : impact of power of microwave, extraction time and solvent. *Jurnal Teknik Kimia USU*, Vol. 6, No. 3 6, 52–57.
- Kasim, A., Asben, A., Mutiar, S., 2018. Easy Ways to Tanning Process of Goat Skin (Cara Mudah Menyamak Kulit Kambing). *ANDI (Anggota IKAPI)*.
- Kasim, A., Asben, A., Mutiar, S., 2015. Kajian Kualitas gambir dan hubungannya dengan karakteristik kulit tersamak. *Majalah Kulit, Karet dan Plastik*. Vol. 31. No.1.

- Kasim, A., Mutiar, S., 2016. Penyamakan kulit kambing untuk memperoleh kulit tersamak berkekuatan tarik tinggi melalui penyamakan kombinasi. Prosiding, Balai Besar Penyamakan Kulit Karet dan Plastik.
- Kasim, A. Novia, D., Mutiar, S., Efendi, A., (2014). Diminishing chromium use on combined chromium- gambier tanning process upon the characteristics of tanned leather. *Media Peternakan*. Vol. 37, No. 1.
- Kasim, A., Novia, D., Mutiar, S., Efendi, A., (2014). Diminishing Chromium Use on Combined Chromium-Gambier Tanning Process Upon the Characteristics of Tanned Leather. *Med Pet* 37, 24–29. <https://doi.org/10.5398/medpet.2014.37.1.24>
- Kasim, A., Novia, D., Mutiar, S., Pinem, J., (2013a). Karakterisasi kulit kambing pada MKKP 29, 1. <https://doi.org/10.20543/mkkg.v29i1.213>  
persiapan penyamakan dengan gambir dan sifat kulit tersamak yang dihasilkan.
- Maier, M., Oelbermann, A.L., Renner, M., Weidner, E., (2017). Screening of European medicinal herbs on their tannin content—New potential tanning agents for the leather industry. *Industrial Crops and Products* 99, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.033>
- Missio, A.L., Tischer, B., dos Santos, P.S.B., Codevilla, C., de Menezes, C.R., Barin, J.S., Haselein, C.R., Labidi, J., Gatto, D.A., Petutschnigg, A., Tondi, G., (2017b). Analytical characterization of purified mimosa (*Acacia mearnsii*) industrial tannin extract: Single and sequential fractionation. *Separation and Purification Technology* 186, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.010>
- Mutiar, S., Kasim, A., Emriadi, E., Asben, A., (2019). Studi awal tanin dari kulit kayu *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. dari hutan tanaman industri untuk bahan penyamak kulit. *MKGP* 34, 41. <https://doi.org/10.20543/mkkg.v34i2.3967>.
- Mutiar, S., Kasim, A., Emriadi, E., Asben, A., (2020). Kajian Implementasi Proses Produksi Leather pada Industri Penyamakan Kulit (Studi Kasus UPTD Pengolahan Kulit Kota Padang Panjang). Prosiding Webinar Nasional Sapi Kerbau IV. 1 P.257-271 ISBN: 978-623-7763-73-84
- Mutiar, S., Kasim, A., Emriadi, E., Asben, A., (2021). Potential And Application Of Vegetable Tanning Materials From Industrial Forest Plantation In Indonesia *Sylwan Journal* 165 (8), 103-117
- Said, M.I., (2012). Ilmu dan Teknologi Pengolahan Kulit. Fakultas Peternakan, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Suparno, O., Covington, A.D., Evans, C.S., (2008). New Environmentally Benign Leather Technology: Combination Tanning Using Vegetable Tannin, Naphthol And Oxazolidine. *J Tek. Ind. Pert.* Vol. 18(2), 79-84 1.
- Suprpti, S., Santoso, E., Djarwanto, D., Turjaman, M., (2012). Pemanfaatan Kompos Kulit Kayu Mangium Untuk Media Pertumbuhan Cendawan Mikoriza Arbuskula Dan Bibit. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 30, 114–123. <https://doi.org/10.20886/jphh.2012.30.2.114-123>
- Wina, E., Susana, I.W.R., Tangendjaja, B., (2008). Biological activity of tanins from *Acacia mangium* bark extracted by different Solvents. *Media Peternakan* 33, 103–107.
- Zakir, M.J., Ramalingam, S., Balasubramanian, P., Rathinam, A., Sreeram, K.J., Rao, J.R., Nair, B.U., (2015). Innovative material from paper and pulp industry for leather processing. *Journal of Cleaner Production* 104, 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.001>.