

**PENGARUH TEKANAN NITROGEN
PADA MIKROSTRUKTUR DAN TOPOLOGI
LAPISAN TIPIS KROMIUM NITRIDA (CrN)**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai persyaratan untuk
memperoleh gelar Sarjana Strata Satu (S1)

Program Studi Fisika



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Diajukan oleh:

Raissa Maulidya Azharia

19106020033

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2023



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-2329/Un.02/DST/PP.00.9/08/2023

Tugas Akhir dengan judul : Pengaruh Tekanan Nitrogen pada Mikrostruktur dan Topologi Lapisan Tipis Kromium Nitrida (CrN)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : RAISSA MAULIDYA AZHARIA
Nomor Induk Mahasiswa : 19106020033
Telah diujikan pada : Jumat, 18 Agustus 2023
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Prof. Dr. rer. nat. Tri Mardji Atmono

SIGNED

Valid ID: 64e81bdd47623



Penguji I

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.

SIGNED

Valid ID: 64e587690d6a9



Penguji II

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si

SIGNED

Valid ID: 64e5f53e01d93



Yogyakarta, 18 Agustus 2023

UIN Sunan Kalijaga

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.

SIGNED

Valid ID: 64e84516a0107

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raissa Maulidya Azharia

NIM : 19106020033

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Pengaruh Tekanan Nitrogen pada Mikrostruktur dan Topologi Lapisan Tipis Kromium Nitrida (CrN)” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 5 Agustus 2023

Penulis



Raissa Maulidya Azharia

NIM. 19106020033



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Raissa Maulidya Azharia
NIM : 19106020033
Judul Skripsi : Pengaruh Tekanan Nitrogen pada Mikrostruktur dan Topologi Lapisan Tipis Kromium Nitrida (CrN)

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Wassalamu'alaikum wr. wb.
Yogyakarta, 2 Agustus 2023

Pembimbing II

Dr. Widayanti, S.Si., M.Si.
NIP. 19760526 200604 2 005

Pembimbing I

Prof. Dr.rer.nat. Tri Mardji Atmono
NIP. 19580614 198103 1 004

MOTTO

وَاسْتَعِينُوا بِالصَّبْرِ وَالصَّلَاةِ إِنَّهَا لَكَبِيرَةٌ إِلَّا عَلَى الْخَاشِعِينَ ﴿٤٥﴾

(2:45) And seek help through patience and prayer, and indeed, it is difficult except for the humbly submissive [to Allah]

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT. yang tidak pernah berhenti memberikan karunia dan hidayah sehingga dengan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Tekanan Nitrogen pada Mikrostruktur dan Topologi Lapisan Tipis Kromium Nitrida (CrN)” dengan segala kemudahan-Nya. Sholawat serta salam tak lupa tercurahkan kepada nabi besar kita, Nabi Muhammad SAW. beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya di yaumul akhir. Keberhasilan dalam penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari segala bentuk semangat dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
2. Kedua orang tua, tante, dan adik-adik tercinta yang tanpa henti memberi dukungan, do'a serta kasih sayang.
3. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, S.Ag., M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Fisika. Semoga diberikan kesehatan dan kekuatan dalam menjalankan amanah.

6. Bapak Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberi arahan dan masukan selama penulis menempuh pendidikan ini.
7. Bapak Prof. Dr.rer.nat. Tri Mardji Atmono selaku Dosen Pembimbing I yang bersedia meluangkan waktu untuk membimbing dan membantu penulis dalam tugas akhir ini. Sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
8. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa memberikan motivasi, masukan, arahan, dan nasihat selama penulis menempuh pendidikan sampai terselesaikannya tugas akhir ini.
9. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Fisika yang telah membagikan ilmunya dan terus memberi semangat.
10. Teman-teman Fisika Angkatan 2019 dan Study Club Material, utamanya Minami, Tika, Fafa, dan ‘Aini yang telah mengarungi pendidikan ini bersama-sama dalam suka maupun duka. Serta saling memberikan dukungan dan kekuatan satu sama lain.
11. Serta semua pihak yang memberikan bantuan dan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu diharapkan kritik dan saran dengan terbuka. Penulis berharap adanya tugas akhir ini dapat menambah inspirasi sekaligus wawasan bagi para pembaca. *Aamiin.*

Wassalamu’alaikum. Wr. Wb.

**PENGARUH TEKANAN NITROGEN
PADA MIKROSTRUKTUR DAN TOPOLOGI
LAPISAN TIPIS KROMIUM NITRIDA (CrN)**

**Raissa Maulidya Azharia
19106020033**

INTISARI

Baja AISI 4140 memiliki kombinasi sifat mekanik berupa kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus yang cukup baik. Namun dalam lingkungan kerja yang keras, baja AISI 4140 akan mengalami kegagalan mekanis seperti *micropitting* dan *scuffing*. Dampak dari kegagalan mekanis tersebut adalah masa pakai komponen yang cenderung pendek menghasilkan limbah sumber daya yang serius. Salah satu upaya dalam peningkatan sifat mekanis dari baja AISI 4140 adalah deposisi lapisan tipis CrN dengan variasi tekanan nitrogen sebesar 3×10^{-3} mbar (CrN-03), 4×10^{-3} mbar (CrN-04), dan 6×10^{-3} mbar (CrN-06). Hasil penelitian menunjukkan kenaikan tekanan nitrogen berbanding lurus dengan meningkatnya ukuran kristalit CrN akibat adanya proses aglomerasi. Sementara nilai parameter kisi CrN berbanding terbalik dengan kenaikan tekanan nitrogen yang disebabkan oleh peningkatan interstisial nitrogen pada kisi kromium. Topologi ketiga sampel menunjukkan kenaikan *surface roughness* sebanding dengan peningkatan tekanan nitrogen yang diberikan. Ketiga sampel lapisan tipis CrN menunjukkan hasil yang paling optimal pada sampel CrN-04. Ini dibuktikan dengan nilai parameter kisi 4,1452 Å yang mendekati *database* dengan ukuran kristalit 19,1 nm. Dislokasi densitas yang diberikan sebesar $2,76 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$. Nilai *surface roughness* yang diberikan untuk S_a , S_q , serta S_z secara berturut-turut adalah 13,4 nm, 16,9, dan 184 nm.

Kata kunci: Lapisan tipis CrN, mikrostruktur, tekanan nitrogen, topologi

**INFLUENCE OF NITROGEN PRESSURE
ON MICROSTRUCTURE AND TOPOLOGY
OF THIN FILM CHROMIUM NITRIDE (CrN)**

Raissa Maulidya Azharia
19106020033

ABSTRACT

Steel AISI 4140 has a good combination of mechanical properties of strength, toughness, and wear resistance. However, steel AISI 4140 will experience mechanical failures such as micropitting and scuffing in hostile work environments. The impact of such mechanical failure is that the short-term use of components results in serious resource waste. One of the attempts to improve the mechanical properties of steel AISI 4140 is depositing CrN thin film in different nitrogen pressure stages with nitrogen pressure varied by 3×10^{-3} mbar (CrN-03), 4×10^{-3} mbar (CrN-04), and 6×10^{-3} mbar (CrN-06). The results show that the size of CrN crystals grows through agglomeration, a corresponding increase in nitrogen pressure is directly proportional. While the CrN lattice parameter values are inversely proportional to the nitrogen pressure's levitate, caused by the interstitial increase of nitrogen in the chromium lattice. After subjecting three separate samples to an elevated nitrogen pressure, it was noted that there was a noticeable augmentation in surface roughness through the topologies. CrN thin films performed best at crN-04. This is proved by a lattice parameter value of 4,1452 Å which approximates the database with a crystallite size of 19,1 nm. The density dislocation point $2,76 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$. The measurements indicate that the surface roughness values for Sa, Sq, and Sz are 13,4 nm, 16,9 nm, and 184 nm, respectively.

Key words: *CrN thin film, microstructure, nitrogen pressure, topology.*

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
SURAT PERSETUJUAN	iv
MOTTO	v
KATA PENGANTAR	vi
INTISARI.....	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	8
1.3. Tujuan Penelitian.....	9
1.4. Batasan Masalah	9
1.5. Manfaat Penelitian.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1. Studi Pustaka	10
2.2. Landasan Teori	15
2.2.1. Tribologi.....	15
2.2.2. Lapisan Tipis CrN.....	17
2.2.3. <i>DC-Sputtering</i>	21
2.2.4. Baja AISI 4140.....	23
2.2.5. <i>XRD</i>	26
2.2.6. <i>AFM</i>	31
BAB III METODE PENELITIAN.....	38
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.1.1. Waktu Penelitian	38

3.1.2. Tempat Penelitian.....	38
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	39
3.2.1. Alat Penelitian.....	39
3.2.2. Bahan Penelitian.....	39
3.3. Prosedur Penelitian	39
3.4. Metode Analisa Data	46
3.4.1. Analisis Data Hasil Karakterisasi <i>XRD</i>	46
3.4.2. Analisis Data Hasil Karakterisasi <i>AFM</i>	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1. Hasil.....	48
4.1.1. Mikrostruktur Lapisan Tipis CrN	48
4.1.2. Topologi Lapisan Tipis CrN	49
4.2. Pembahasan	53
4.2.1. Mikrostruktur Lapisan Tipis CrN	53
4.2.2. Topologi Lapisan Tipis CrN	58
4.3. Integrasi-Interkoneksi.....	65
BAB V PENUTUP.....	67
5.1. Kesimpulan.....	67
5.2. Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN.....	75

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Posisi penelitian.....	14
Tabel 2.2 Karakteristik beberapa senyawa <i>TMN</i> (Zhong dkk., 2015).....	19
Tabel 2.3 Sifat termomekanik dari pelakuan berbaasis karbon dan nitrogen (Holmberg & Matthews, 2009)	21
Tabel 2.4 Perbandingan parameter metode <i>sputtering</i> dan evaporasi (Abu-Thabit & Makhlouf, 2019)	22
Tabel 2.5 Komposisi kimia baja AISI 4140 (Fushun Special Steel, 2022a)	24
Tabel 2.6 Sifat mekanis baja AISI 4140 (Fushun Special Steel, 2022b).....	25
Tabel 3.1 Waktu Penelitian	38
Tabel 3.2 Daftar alat karakterisasi lapisan tipis CrN.....	39
Tabel 3.3 Daftar alat pengolah data hasil karakterisasi	39
Tabel 3.4 Daftar bahan	39
Tabel 3.5 Tabel data mikrostruktur lapisan tipis CrN	46
Tabel 3.6 Tabel data parameter <i>surface roughness</i> lapisan tipis CrN.....	47
Tabel 4.1 Mikrostruktur lapisan tipis CrN.....	49
Tabel 4.2 Parameter <i>surface roughness</i> lapisan tipis CrN.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Contoh aplikasi tribologi (Randall, 2017).....	1
Gambar 1.2	<i>Surface coating</i>	2
Gambar 2.1	Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat/karakteristik material permukaan terlapisi (Holleck, 1986).....	16
Gambar 2.2	Metode deposisi lapisan permukaan (Holmberg & Matthews, 2009).....	17
Gambar 2.3	Klasifikasi konfigurasi struktur lapisan, garis, dan titik dalam tiga dimensi (Freund & Suresh, 2003).....	18
Gambar 2.4	Struktur senyawa CrN (Vesta, 2022).....	20
Gambar 2.5	Skema alat <i>DC-Sputtering</i>	23
Gambar 2.6	Bentuk baja AISI 4140; (a) <i>round bar</i> (SBC Trading, t.t.) dan (b) lembaran (Global Source, t.t.).....	25
Gambar 2.7	Skema <i>XRD</i> (Mahadeshwara, 2022).....	27
Gambar 2.8	Difraktogram lapisan tipis CrN pada tekanan N ₂ (a) 10 kPa dan (b) 40 kPa (Shen & Wang, 2011).....	28
Gambar 2.9	Visualisasi <i>FWHM</i>	30
Gambar 2.10	Plot relasi Williamson-Hall (Vinila & Isac, 2022).....	31
Gambar 2.11	(a) Instrumen <i>AFM</i> dan (b) skema blok optik.....	32
Gambar 2.12	Hasil citra <i>AFM</i> dan <i>line profile</i> (“Tribology and Characterization of Surface Coatings,” 2022).....	33
Gambar 2.13	Visualisasi parameter R_p pada permukaan (Olympus, 2023).....	34
Gambar 2.14	Visualisasi parameter R_v pada permukaan (Olympus, 2023).....	35
Gambar 2.15	Visualisasi parameter R_z pada permukaan (Olympus, 2023).....	35
Gambar 2.16	Visualisasi parameter R_a pada permukaan (Olympus, 2023).....	36
Gambar 2.17	Visualisasi parameter R_q pada permukaan (Olympus, 2023).....	36
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	40
Gambar 3.2	Diagram alir tahapan deposisi lapisan tipis CrN menggunakan metode <i>DC-Sputtering</i>	42
Gambar 3.3	Difraktogram <i>COD 1010974</i>	44
Gambar 3.4	Garis horizontal untuk perhitungan parameter R_a , R_q , dan R_z	45

Gambar 4.1	Difraktogram hasil <i>XRD</i> ketiga sampel.....	48
Gambar 4.2	Pengaruh tekanan nitrogen terhadap parameter mikrostruktur kisi dan ukuran kristalit	49
Gambar 4.3	Topologi lapisan tipis CrN-03 dalam (a) 2D dan (b) 3D.....	50
Gambar 4.4	Topologi lapisan tipis CrN-04 dalam (a) 2D dan (b) 3D.....	50
Gambar 4.5	Topologi lapisan tipis CrN-06 dalam (a) 2D dan (b) 3D.....	51
Gambar 4.6	Pengaruh tekanan nitrogen terhadap parameter S_a	52
Gambar 4.7	Pengaruh tekanan nitrogen terhadap parameter S_q	52
Gambar 4.8	Pengaruh tekanan nitrogen terhadap parameter S_z	53
Gambar 4.9	Orientasi fasa CrN [200] dan [220]	54
Gambar 4.10	Polikristalin CrN.....	54
Gambar 4.11	Proses peningkatan interstisial nitrogen pada kisi kromium	55
Gambar 4.12	<i>Line profile</i> CrN-03	61
Gambar 4.13	<i>Line profile</i> CrN-04	62
Gambar 4.14	<i>Line profile</i> CrN-06	62
Gambar 4.15	Pengaruh tekanan nitrogen terhadap ukuran kristalit (D) dan S_a ...	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Parameter Deposisi	75
Lampiran 2.	Data Sampel	75
	A. Sampel CrN-03, CrN-04, dan CrN-06.....	75
	B. Data <i>COD</i>	76
	C. Difraktogram hasil <i>XRD</i> sebelum diolah.....	77
	D. Topologi hasil <i>AFM</i> sebelum diolah	78
Lampiran 3.	Proses Pengolahan Data	79
	A. Pengolahan Data <i>XRD</i>	79
	B. Pengolahan Data <i>AFM</i>	97
Lampiran 4.	Perhitungan.....	103
	A. Perhitungan <i>XRD</i>	103
	B. Perhitungan <i>AFM</i>	103

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sejak awal periode revolusi industri pada abad ke-18 di Inggris Raya, kecepatan dari produksi peralatan industri telah mengalami peningkatan secara pesat sampai detik ini. Kecepatan produksi ini juga diimbangi dengan berkurangnya biaya dengan mengurangi gesekan dan keausan dari mesin selama proses produksi. Pada tahun 1966, Jost memperkenalkan istilah ‘tribologi’ dalam laporannya yang kini dikenal sebagai *Jost Report* (Alam, 2021). Tribologi merupakan studi ilmu pengetahuan dan teknik yang mempelajari interaksi antar permukaan dalam gerak relatif mencakup teori dan penerapan dari prinsip gesekan, pelumasan atau lubrikasi, dan keausan. Tribologi berasal dari istilah Yunani yaitu *tribos* yang berarti menggosok, sehingga secara harfiah tribologi bermakna ilmu menggosok (Affatato & Grillini, 2013). Salah satu contoh aplikasi tribologi adalah pelumasan roda gigi yang tercantum dalam **Gambar 1.1**.



Gambar 1.1 Contoh aplikasi tribologi (Randall, 2017)

Pada beberapa dekade terakhir, tribologi telah berkembang secara masif. Salah satunya pada segmen *surface coating* atau pelapisan permukaan. *Surface coating* bertujuan untuk meningkatkan kinerja tribologis dan/atau sifat fisika serta

kimia lainnya pada permukaan padat, seperti yang terlihat pada **Gambar 1.2** berikut. Semenjak tribologi diperkenalkan, berkembang banyak penelitian mengenai pemahaman respon material berukuran besar (*bulk*), baik berupa padatan maupun cairan. Terlepas dari kemajuan mengesankan yang dicatat dalam pemahaman kinerja tribologis material *bulk*, perkembangan paling spektakuler pada abad ini dihasilkan dari peran lapisan tipis, baik padat maupun cair, dalam tribologi (utamanya sebagai material *surface coating*) (Dowson, 1993).



Gambar 1.2 *Surface coating*

Surface coating mencakup berbagai bahan baku, baik organik maupun anorganik dalam bentuk padat atau cair. Salah satu jenis dari *surface coating* adalah *hard coating* atau pelapis keras. Nitrida, oksida, karbida, dan borida merupakan contoh bahan *hard coating* yang digunakan secara luas dalam elemen mesin, alat kerja berbahan dasar logam, elemen otomotif dan sebagainya. *Hard coating* pada umumnya berupa deposisi lapisan tipis pada permukaan suatu target. Deposisi lapisan tipis dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti *chemical vapor deposition (CVD)*, *physical vapor deposition (PVD)*, *thermal spray*, dan metode lainnya pada berbagai jenis material substrat (Meng dkk., 2020). Lapisan tipis adalah suatu lapisan dari material yang memiliki ketebalan pada rentang nanometer hingga beberapa mikrometer (Schuegraf & Seshan, 2002). Lapisan tipis dapat dibuat dari berbagai bahan, termasuk bahan organik, anorganik, logam, maupun campuran logam organik (*organometallic*) yang bersifat konduktor,

semikonduktor, superkonduktor dan isolator (Atmono dkk., 2007). Lapisan tipis berbahan dasar logam, seperti seng (Zn), biasa digunakan untuk proteksi substrat dari korosi serta peluruhan. Selain Zn, kromium (Cr) dan nikel (Ni) juga banyak digunakan sebagai material lapisan tipis dalam *hard coating* (Wilson dkk., 1987). Akan tetapi, bahan dasar logam jarang diaplikasikan pada keadaan murni. Logam lebih banyak digunakan dalam bentuk campuran atau paduan. Hal ini bertujuan untuk mengeksploitasi atau memperkuat sifat logam yang diinginkan dengan mengatasi karakteristik yang membatasi performa material (Oyama, 1996).

Salah satu paduan logam yang banyak digunakan dalam aplikasi *hard coating* adalah *transition metal nitride* (TMN) (Oyama, 1996). TMN memiliki struktur elektronik yang unik, konduktivitas listrik yang tinggi, stabilitas kimia yang unggul, dan ketahanan mekanis yang sangat baik, sehingga sesuai untuk aplikasi tribologi (khususnya *hard coating*) (He dkk., 2021). Beberapa senyawa yang masuk ke dalam kategori TMN antara lain titanium nitrida (TiN), tantalum nitrida (TaN), dan kromium nitrida (CrN). Dari ketiga senyawa tersebut, TaN memiliki nilai *microhardness* yang paling baik jika dibandingkan dengan TiN dan CrN. Kelemahan dari TaN sendiri adalah harganya yang mahal dan sulit untuk didapatkan. Sementara TiN memiliki nilai *microhardness* yang lebih baik dibanding CrN, namun nilai resistivitas elektriknya rendah sehingga kurang menguntungkan untuk digunakan sebagai material *hard coating*. CrN memiliki nilai *microhardness* yang lebih rendah tetapi nilai resistivitas elektriknya sangat tinggi (Zhong dkk., 2015). Menimbang kesesuaian karakteristik material untuk *hard coating*, CrN kemudian dipilih sebagai material lapisan tipis pada penelitian

ini. Alasan dari pemilihan CrN dikarenakan ketahanan korosinya pada suhu lingkungan maupun suhu tinggi sangat baik, apabila dibandingkan dengan logam TMN lainnya. Harga CrN juga relatif lebih terjangkau dan memiliki laju deposisi yang tinggi untuk parameter deposisi yang hampir sama (Tripathi dkk., 2019).

Beberapa penelitian mengenai lapisan tipis CrN telah dilakukan dengan berbagai jenis substrat. Shah (2017) berhasil mendeposisikan lapisan tipis CrN pada substrat Si dengan kenaikan nilai *nanohardness* yang terukur sebelum deposisi adalah 31 GPa, menjadi 250 GPa. Sementara pada tahun 2021, Saravanakumar berhasil melakukan deposisi lapisan tipis CrN pada baja EN 24. Kekerasan yang terukur pada substrat baja EN 24 sebelum deposisi sebesar 230 HV, meningkat hingga 371 HV setelah terbentuknya lapisan tipis CrN. Artinya, *hard coating* menggunakan lapisan tipis CrN berhasil meningkatkan kekerasan atau nilai mekanik dari suatu material. Silikon dan baja merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam industri. Silikon adalah unsur metaloid yang dapat berdiri sendiri, sementara baja merupakan campuran dari beberapa unsur seperti besi, karbon, dan unsur lainnya (termasuk silikon). Baja telah menjadi fondasi dalam perkembangan industri 100 tahun terakhir. Sektor industri yang banyak memanfaatkan baja antara lain sektor energi, konstruksi, otomotif dan transportasi, infrastruktur, serta pengemasan dan mesin (World Steel Association, 2020). Salah satu jenis baja yang banyak digunakan adalah baja AISI 4140.

Keberadaan unsur logam tertuang di dalam Al-Qur'an. Allah SWT. telah berfirman dalam QS. Al-Kahfi ayat 96 yang berbunyi.

أُوتِي زُبْرَ الْحَدِيدِ حَتَّى إِذَا سَاوَى بَيْنَ الصَّدَفَيْنِ قَالَ انْفُخُوا حَتَّى إِذَا جَعَلَهُ نَارًا قَالَ أُوتِي أَوْعَ عَلَيْهِ
 قَطْرًا ﴿٦٦﴾

Artinya : “Berilah kepadaku keeping-kepingan besi! Sehingga sesudah dia ratakan kedua tepi gunung itu, dia pun berkata: Tiuplah! Sehingga setelah dia menjadikan itu jadi api, dia berkata (pula): Berilah kepadaku tembaga yang sudah dilebur untuk aku tuangkan kepadanya.”

Berdasarkan tafsir Al-Mishbah (2002), kata (زبر) *zubur* adalah bentuk jamak dari kata (زبرة) *zubrah* yaitu potongan-potongan besi yang besar. Sebuah bangunan tidak hanya terdiri dari besi dan tembaga semata-mata, tetapi juga elemen lain-lain. Hanya saja karena besi itu penting dan tidak semudah menemukan batu, maka besi itulah yang secara khusus disebut sekaligus untuk menggambarkan kekukuhannya. Besi merupakan komponen utama yang digunakan dalam manufaktur baja, seperti dalam baja AISI 4140. Sementara, kata (قطرا) *qithran* terambil dari kata (قطر) *qathara* yakni menetes dengan makna dalam ayat ini sebagai ‘tembaga yang mencair’. Salah satu cara yang ditempuh dewasa ini untuk menguatkan besi adalah mencampurkannya dengan kadar tertentu dari tembaga. Petunjuk yang diberikan Allah dalam memadukan logam merupakan salah satu hakikat yang mendahului penemuan ilmiah sekian abad lamanya (Shihab, 2002a).

Baja AISI 4140 berdasarkan komposisi kimia tergolong dalam jenis baja *chromium-molybdenum steel* (Widyawati dkk., 2014). Menurut Bandanadjaja dkk. (2019), baja AISI 4140 memiliki kombinasi sifat kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus yang cukup baik. Meski memiliki sifat mekanis yang cukup baik, ketika baja AISI 4140 berada pada lingkungan kerja yang keras (seperti suhu tinggi, korosi, oksidasi, dan tribologi) akan mengakibatkan kegagalan mekanis yang berdampak besar. Kegagalan mekanis tersebut meliputi *micropitting*, *scuffing*, yang

dapat menyebabkan kerusakan komponen. Setelah komponen rusak, komponen akan dibuang begitu saja dan mengakibatkan limbah sumber daya yang serius (Liu dkk., 2017). Sebagai Khalifah yang diutus oleh Allah SWT., sudah seharusnya untuk selalu menjaga kelestarian lingkungan termasuk dengan mengendalikan limbah. Sebagaimana firman Allah SWT. dalam QS. Ar-Rum ayat 41, yang berbunyi.

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ
يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

Artinya : “Telah nyata kerusakan di darat dan di laut dari sebab buatan tangan manusia, supaya mereka deritakan setengah dari apa yang mereka kerjakan, mudah-mudahan mereka kembali.”

Kata (الفساد) *al-fasad* menurut al-Ashfahani adalah keluarnya sesuatu dari keseimbangan, baik sedikit maupun banyak. Kata ini digunakan merujuk apa saja, baik jasmani, jiwa, maupun hal-hal lain dan diartikan sebagai antonim dari (الصلاة) *ash-shalah* yang berarti manfaat. Ayat di atas menyebut darat dan laut sebagai tempat terjadinya *fasad*. Ini dapat berarti daratan dan lautan menjadi wilayah kerusakan, ketidakseimbangan serta kekurangan manfaat. Laut telah tercemar, sehingga ikan mati dan hasil laut berkurang. Daratan semakin panas sehingga terjadi kemarau panjang. Isyarat keseimbangan lingkungan menjadi kacau menjadi dasar para ulama kontemporer memahami ayat ini sebagai isyarat tentang kerusakan lingkungan. Dosa dan pelanggaran (*fasad*) yang dilakukan manusia, mengakibatkan gangguan keseimbangan di darat maupun laut. Ketidakseimbangan alam akan mengakibatkan siksaan kepada manusia (Shihab, 2002a).

Berdasarkan pemaparan tersebut, dibutuhkan proses manufaktur yang efisien dan dapat memperpanjang masa pakai baja AISI 4140 (Liu dkk., 2017) sebagai

pencegahan terjadinya penumpukan limbah sumber daya. Salah satunya dengan *hard coating* menggunakan lapisan tipis CrN. Pada penelitian Shah dkk. (2010), telah diamati pengaruh parameter deposisi terhadap mikrostruktur lapisan tipis CrN menggunakan substrat baja SA-304. Beberapa parameter deposisi yang mempengaruhi terbentuknya lapisan tipis antara lain adalah tekanan nitrogen, penggunaan jenis gas inert, serta suhu substrat. Untuk parameter tekanan nitrogen, dilakukan variasi sebesar 20% sampai dengan 50% yang menunjukkan adanya peningkatan kepadatan pada lapisan tipis yang terbentuk seiring dengan kenaikan besar tekanan nitrogen. Kesuksesan penelitian Shah dkk. (2010) kemudian menjadi dasar dari penentuan tekanan nitrogen yang digunakan dalam penelitian ini dengan menyesuaikan keadaan konkrit di laboratorium.

Keberhasilan *hard coating* tidak lepas dari perubahan sifat mekanis. Sifat mekanis ini dapat ditinjau dari mikrostruktur dan topologi lapisan tipis CrN yang terbentuk. Mikrostruktur dan topologi dari lapisan tipis CrN yang terbentuk pada penelitian ini dipengaruhi oleh parameter deposisi berupa tekanan nitrogen. Mikrostruktur suatu material terdiri atas berbagai fase dari variabel bentuk, ukuran, dan distribusinya. Mikrostruktur penting untuk dikaji sebagai pemahaman tingkat lanjut akan karakteristik material yang terbentuk akibat hubungan dari sifat makroskopis dan fenomena yang terjadi pada skala mikro (Mercier dkk., 2002). Mikrostruktur lapisan tipis CrN pada penelitian ini diharapkan memiliki nilai parameter kisi yang mendekati nilai *database* sebesar $4,144 \text{ \AA}$ dengan *defect* yang rendah. Sementara informasi mengenai topologi suatu material sangat krusial untuk memahami karakteristik struktur material (Huber, 2018). Hasil topologi diharapkan

memiliki kontur yang tidak terlalu ekstrim dengan nilai parameter *surface roughness* rendah. Untuk mengetahui mikrostruktur serta topologi lapisan tipis CrN yang terbentuk, maka diperlukan karakterisasi menggunakan *X-ray Diffraction (XRD)* dan *Atomic Force Microscope (AFM)*. Pengaruh tekanan nitrogen terhadap mikrostruktur dan topologi dari hasil karakterisasi dapat dijadikan pertimbangan lanjut penggunaan lapisan tipis CrN sebagai *hard coating* baja AISI 4140.

Meninjau latar belakang yang telah dipaparkan, maka diperlukan penelitian mengenai pengaruh tekanan nitrogen dalam perubahan mikrostruktur dan topologi lapisan tipis CrN. Penelitian ini menggunakan lapisan tipis yang telah dideposisi terlebih dahulu dalam penelitian sebelumnya (Azharia, 2022). Penelitian sebelumnya meneliti tentang proses deposisi lapisan tipis menggunakan metode *DC-sputtering* pada kerja praktik yang dilakukan penulis. Area kajian penelitian ini merupakan kolaborasi dengan penelitian thesis Fauzi (2023). Sementara pada penelitian ini ditekankan pada kajian mikrostruktur dan topologi lapisan tipis CrN yang telah dihasilkan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, permasalahan yang menjadi dasar penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh tekanan nitrogen terhadap mikrostruktur lapisan tipis CrN yang terbentuk?
2. Bagaimana pengaruh tekanan nitrogen terhadap topologi lapisan tipis CrN yang terbentuk?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini, sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh tekanan nitrogen terhadap mikrostruktur lapisan tipis CrN yang terbentuk.
2. Menganalisis pengaruh tekanan nitrogen terhadap topologi lapisan tipis CrN yang terbentuk.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dalam pengerjaannya dibatasi pada hal-hal berikut.

1. Lapisan tipis CrN yang digunakan telah dideposisi pada penelitian sebelumnya menggunakan metode *DC-Sputtering*. Terdapat parameter deposisi yang diatur antara lain waktu deposisi selama 25 menit, argon digunakan sebagai gas inert, dan variasi tekanan nitrogen yang digunakan sebesar 3×10^{-3} mbar, 4×10^{-3} mbar, dan 6×10^{-3} mbar.
2. Parameter yang berkaitan dengan mikrostruktur lapisan tipis CrN dikarakterisasi menggunakan *XRD*.
3. Parameter yang berkaitan dengan topologi lapisan tipis CrN dikarakterisasi menggunakan *AFM*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini antara lain adalah.

1. Mengetahui pengaruh tekanan nitrogen pada mikrostruktur dan topologi dari lapisan tipis CrN yang terbentuk.
2. Menjadi referensi untuk penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi lapisan tipis CrN pada bidang terapan tribologi.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan tahapan penelitian dan karakterisasi terhadap lapisan tipis CrN yang dideposisi pada baja AISI 4140, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Kenaikan tekanan nitrogen dalam deposisi lapisan tipis CrN mempengaruhi mikrostruktur yang terbentuk. Ukuran kristalit meningkat dengan adanya kenaikan tekanan nitrogen akibat terjadinya proses aglomerasi. Sedangkan naiknya tekanan nitrogen memicu penurunan nilai parameter kisi karena peningkatan interstisial nitrogen pada atom kromium. Hasil optimal ditunjukkan sampel CrN-04 dengan nilai parameter kisi sebesar 4,1452 Å dengan ukuran kristalit 19,052 nm. Dislokasi densitas sampel CrN-04 $2,7552 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$.
2. Topologi ketiga sampel menunjukkan, kenaikan tekanan nitrogen menghasilkan permukaan lapisan tipis dengan *surface roughness* yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh distribusi atom yang tidak merata. Jarak antara material target dengan substrat yang terlalu dekat selama proses deposisi menjadi salah satu penyebab utama tidak meratanya distribusi atom. Dari ketiga sampel, CrN-04 menunjukkan nilai *surface roughness* paling kecil. Nilai S_a , S_q , serta S_z sampel CrN-04 secara berturut-turut adalah 13,43 nm, 16,88, dan 184 nm.

5.2. Saran

Adapun beberapa saran dari penelitian yang telah dilakukan. Saran ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya.

1. Parameter deposisi lapisan tipis CrN yang perlu diperhatikan kembali, seperti kondisi vakum pada *sputtering chamber*, jarak material target dengan substrat, serta proses sterilisasi. Optimasi parameter lainnya seperti suhu deposisi dan laju aliran gas argon juga diperlukan.
2. Diperlukan karakterisasi lain yang mendukung analisis mikrostruktur dan topologi seperti *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)*.
3. Untuk memahami lebih lanjut hubungan antara perubahan mikro dari lapisan tipis CrN akibat tekanan nitrogen terhadap sifat mekanik yang dihasilkan, diperlukan tahap uji lanjutan seperti uji ketahanan, uji keausan, dan sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Thabit, N. Y., dan Makhlof, A. S. H. 2019. Fundamental of smart coatings and thin films: Synthesis, deposition methods, and industrial applications. Dalam *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849870-5.00001-X>
- Affatato, S., dan Grillini, L. 2013. Topography in bio-tribocorrosion. Dalam *Bio-Tribocorrosion in Biomaterials and Medical Implants*. <https://doi.org/10.1533/9780857098603.1>
- Al Hasa, M. H. 2007. Karakterisasi Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Paduan Intermetalik Alfeni Sebagai Bahan Kelongsong Bahan Bakar. *Teknologi Bahan Nuklir*, **Vol.3 No.2 Juni 2007** : 86–96.
- Alam, M. S. 2021. Industrial tribology in the past, present and future: a review. *Material Science & Engineering International Journal*, **Vol.5 No.3 April 2021**. <https://doi.org/10.15406/mseij.2021.05.00160>
- Arnell, D. 2010. Mechanisms and laws of friction and wear. Dalam *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain* : 41–72. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845699932.1.41>
- Atmono, T. M., B.S.U, A., dan Sari, M. M. 2007. Preparasi Lapisan Tipis Sambungan p-n ZnO dan CuInSe Menggunakan Penyangga Lapisan CdS Untuk Aplikasi Sel Surya. *Prosiding PPI - PDIPTN*, **Juli 2007** : 153–159.
- Atmono, T. M., Purniawan, A., Hermastuti, R., dan Purwaningsih, H. 2018. Effect of deposition time of sputtering Ag-Cu thin film on mechanical and antimicrobial properties. *Proceedings of the 3rd International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology*, **2017**. <https://doi.org/10.1063/1.5030230>
- Atmono, T., Usada, W., Suryadi, dan Purwadi, A. 1999. Konstruksi dan Uji Karakteristik Sistem RF-Sputtering Untuk Preparasi Lapisan Tipis. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah*, **Juli 1995** : 80–85.
- Azharia, R. M. 2022. *Karakterisasi XRD Pada Lapisan Tipis Berbasis CrN Hasil Sintesis Menggunakan Metode DC Sputtering*. (Laporan Kerja Praktek), Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga, Yogyakarta.
- Bandanadjaja, B., Idamayanti, D., dan Hanafi, R. A. 2019. Rancangan Proses Perlakuan Panas Untuk Meningkatkan Sifat Ketahanan Erosi Baja Aisi 4140. *Metalurgi*, **Vol.3 November 2019** : 101–108.
- Batko, I., Batkova, M., dan Lofaj, F. 2014. Electrical resistivity of CrN thin films. *Acta Physica Polonica A*, **Vol.126 No.1 Juli 2014**. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.126.415>

- Benelmekki, M., dan Erbe, A. 2019. Chapter 1 - Nanostructured thin films—background, preparation and relation to the technological revolution of the 21st century. Dalam M. Benelmekki & A. Erbe (Ed.), *Frontiers of Nanoscience*, **Vol.14** : 1–34. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102572-7.00001-5>
- Brandenburg, K., Putz, H., dan Berndt, M. Tanpa tahun. *Rietveld Refinement*. Diambil 4 Juni 2023, dari https://www.crystalimpact.com/match/help/idh_Rietveld.htm
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. Gabriela, dan Aboul-Enein, H. Y. 2015. X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. Dalam *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **Vol.45 No.4 Mei 2015** : 289-299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Devadasan, D. S., Baker, M. A., dan Watts, J. F. 2022. Quantitative atomic force microscopy: A statistical treatment of high-speed AFM data for quality control applications. *Ultramicroscopy*, **No.239 Mei 2022**. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2022.113546>
- Dolabella, S., Borzì, A., Dommann, A., dan Neels, A. 2022. Lattice Strain and Defects Analysis in Nanostructured Semiconductor Materials and Devices by High-Resolution X-Ray Diffraction: Theoretical and Practical Aspects. Dalam *Small Methods*, **Vol.6 No.2 Desember 2021**. <https://doi.org/10.1002/smtd.202100932>
- Dowson, D. 1993. Thin Films in Tribology. *Tribology Series*, **Vol.25 September 1992** : 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70358-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70358-4)
- Fauzi, D. Z. 2023. *Pengaruh Komposisi Gas Ar:N₂ dan Penambahan Ni-Co Terhadap Pelapisan CrN Thin Film Menggunakan Metode Reactive Sputtering yang Dideposisikan Pada AISI 4140*. (Thesis), Departemen Teknik Material, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Ferreira, R., Carvalho, Ó., Sobral, L., Carvalho, S., dan Silva, F. 2020. Influence of morphology and microstructure on the tribological behavior of arc deposited CrN coatings for the automotive industry. *Surface and Coatings Technology*, **Vol.397 September 2020**. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126047>
- Freund, L. B., dan Suresh, S. 2003. *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fushun Special Steel. 2022. *AISI 4140 Alloy Steel*. Diambil 27 Mei 2023, dari <https://www.fushunspecialsteel.com/aisi-4140-alloy-steel/>
- Gharavi, M. A., Kerdsonpanya, S., Schmidt, S., Eriksson, F., Nong, N. V., Lu, J., Balke, B., Fournier, D., Belliard, L., Le Febvrier, A., Pallier, C., dan Eklund, P. (2018). Microstructure and thermoelectric properties of CrN and CrN/Cr₂N thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **Vol.51 No.35 Juli 2018**. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad2ef>

- Global Source. Tanpa tahun. *AISI 4140 SAE 4140 ASTM A1011 high alloy hot rolled steel plate sheet*. Diambil 14 Maret 2023, dari <https://www.globalsources.com/Carbon-steel/hot-rolled-sheet-metal-1185635234p.htm>
- Gopala, V., Vasilie, L., dan Kvam, E. P. 2001. Strain relaxation and dislocation introduction in lattice-mismatched inas/gap heteroepitaxy. *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*, **Vol.81 No.10 Desember 2000**. <https://doi.org/10.1080/01418610108217159>
- Gubicza, J. 2014. X-ray line profile analysis in materials science. Dalam *X-Ray Line Profile Analysis in Materials Science*. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5852-3>
- He, Y., Gao, K., Yang, H., Pang, X., dan Volinsky, A. A. 2021. Nitrogen effects on structure, mechanical and thermal fracture properties of CrN films. *Ceramics International*, **Vol.47 No.21 Juli 2021** : 30729-30740. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.252>
- Holleck, H. 1986. Material selection for hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **Vol.4 No.6 November 1986** : 2661-2669. <https://doi.org/10.1116/1.573700>
- Holmberg, K., dan Matthews, A. 2009. *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering*. Oxford: Elsevier.
- Huber, N. 2018. Connections between topology and macroscopic mechanical properties of three-dimensional open-pore materials. *Frontiers in Materials*, **Vol.5 November 2018**. <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00069>
- Jinxin, W., Feng, X., Peng, Y., Xiaolong, T., dan Dunwen, Z. 2017. The effects of nitrogen partial pressure on the microstructure of amorphous carbon nitride films. *Integrated Ferroelectrics*, **Vol.180 No.1 September 2017** : 139-148. <https://doi.org/10.1080/10584587.2017.1338917>
- Li, W., Vittoriotti, M., Jongbloed, G., dan Sietsma, J. 2020. The combined influence of grain size distribution and dislocation density on hardness of interstitial free steel. *Journal of Materials Science & Technology*, **Vol.45 Mei 2020** : 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.025>
- Liu, Z., Cong, W., Kim, H., Ning, F., Jiang, Q., Li, T., Zhang, H. Chao, dan Zhou, Y. 2017. Feasibility Exploration of Superalloys for AISI 4140 Steel Repairing using Laser Engineered Net Shaping. *Procedia Manufacturing*, **Vol.10** : 912-922. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.080>
- Magonov, S. N., dan Whangbo, M.-H. 1996. *Surface Analysis with STM and AFM*. Weinheim: VCH.

- Mahadeshwara, M. R. 2022. *XRD – X-ray diffraction*. Diambil 14 Maret 2023, dari <https://www.tribonet.org/wiki/xrd-x-ray-diffraction/>
- Material Welding. 2023. *AISI 4140 Steel (UNS G41400) Material Properties*. Diambil 14 Maret 2023, dari <https://www.materialwelding.com/aisi-4140-steel-uns-g41400-material-properties/>
- Matt Hughes. 2016. *What is DC Sputtering?* Diambil 29 Desember 2022, dari <https://www.semicore.com/news/94-what-is-dc-sputtering>
- Menezes, P. L., Kishore, Kailas, S. V., dan Lovell, M. R. 2011. Role of surface texture, roughness, and hardness on friction during unidirectional sliding. *Tribology Letters*, **Vol.41 No.1 Juli 2010** : 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9676-3>
- Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., dan Hu, Y. 2020. A review of recent advances in tribology. Dalam *Friction* **Vol.8 No.2 Februari 2020** : 221-300. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>
- Mercier, J. P., Zambelli, G., dan Kurz, W. 2002. Chapter 10 - Microstructures. Dalam J. P. Mercier, G. Zambelli, & W. Kurz (Ed.), *Introduction to Materials Science* : 239–259. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-2-84299-286-6.50016-0>
- Navinsek, B., dan Seal, S. 2001. Transition metal nitride functional coatings. *JOM*, **Vol.53 No.9 September 2001** : 51–54. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0072-1>
- Olympus. 2023. *Surface Roughness Measurement—Parameters*. Diambil 12 April 2023, dari <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>
- Oyama, S. T. 1996. *Introduction to the chemistry of transition metal carbides and nitrides*. Berlin: Springer.
- Randall, N. X. 2017. *What maintenance professionals should know about tribology*. Diambil 28 Maret 2023, dari <https://www.mromagazine.com/features/what-maintenance-professionals-should-know-about-tribology/>
- Salsabila, N. 2023. *Memahami Faktor-faktor yang Mempengaruhi Hasil Pengukuran Kekerasan Material dengan Hardness Tester*. Diambil 9 Juli 2023, dari <https://mitech-ndt.co.id/memahami-faktor-faktor-yang-mempengaruhi-hasil-pengukuran-kekerasan-material-dengan-hardness-tester/>
- Saravanakumar, R. 2021. Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Chromium Nitride (CrN) Coating. *Journal of Materials Engineering and Nanoscience*, **Vol.1 No.1 September 2021** : 6-11. <https://doi.org/10.55039/jmen.21.1.611>

- SBC Trading. Tanpa tahun. *Steel AISI 4140 round rectified H7 length 1000mm*. Diambil 14 Maret 2023, dari https://www.sbc-trading.fr/en/steel-aisi-4140-round-rectified-h7-length-1000mm-xml-398_470_353-837.html
- Schuegraf, K. K., dan Seshan, K. 2002. *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques: Principles, Methods, Equipment and Applications*. New York: Noyes Publication.
- Shah, H. N. 2017. Structural and mechanical characterisation of the chromium nitride hard coating deposited on the silicon and glass substrate. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, **Vol.14 No.1 Maret 2017** : 3872-3886. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.1.2017.5.0315>
- Shah, H. N., Jayaganthan, R., Kaur, D., dan Chandra, R. 2010. Influence of sputtering parameters and nitrogen on the microstructure of chromium nitride thin films deposited on steel substrate by direct-current reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, **Vol.518 No.20 Agustus 2010** : 5762-5768. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.095>
- Shen, L., dan Wang, N. 2011. Effect of nitrogen pressure on the structure of Cr-N, Ta-N, Mo-N, and W-N nanocrystals synthesized by arc discharge. *Journal of Nanomaterials*, **Vol.2011 No.52 Januari 2011** : 1-5. <https://doi.org/10.1155/2011/781935>
- Shihab, M. Q. (2002a). *TAFSIR AL-MISHBAH: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 8). Tangerang: Lentera Hati.
- Shihab, M. Q. (2002b). *TAFSIR AL-MISHBAH: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 6). Tangerang: Lentera Hati.
- Society of Tribologists and Lubrication Engineers. Tanpa tahun. *Introduction to Tribology*. Diambil 11 Maret 2023, dari https://www.stle.org/files/What_is_tribology/Tribology_Applications.aspx
- Speakman, S. A. 2012. *Estimating Crystallite Size Using XRD*. Diambil 9 Juli 2023, dari <http://prism.mit.edu/XRAY/oldsite/CrystalSizeAnalysis.pdf>
- Sproul, W. D., Christie, D. J., dan Carter, D. C. 2005. Control of reactive sputtering processes. *Thin Solid Films*, **Vol.491 No.1-2 November 2005** : 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.05.022>
- Sujana, W., dan Astana Widi, K. 2017. Compared of Surface Roughness Nitride Layers formed on Carbon and Low Alloy steel. *International Journal of Engineering Research and Science*, **Vol.3 No.5 Mei 2017** : 69-73. <https://doi.org/10.25125/engineering-journal-ijoer-may-2017-28>
- Thomas, T. R. 1998. *Rough surfaces*. London: Imperial College Press.
- Totten, G. E. 1992. ASM handbook, Volume 18: friction, lubrication, and wear technology. Belanda: ASM International.

- Tribology and Characterization of Surface Coatings. 2022. Dalam S. Ahmed & V. S. Dakre (Ed.), *Tribology and Characterization of Surface Coatings*. <https://doi.org/10.1002/9781119818878>
- Tripathi, Y., Gupta, R., Seema, Gupta, M., Phase, D. M., dan Rajput, P. 2019. Study of phase formulation in CrN thin films and its response to a minuscule oxygen flow in reactive sputtering process. *Thin Solid Films*, **Vol.670 Januari 2019** : 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.10.009>
- Ueda, M., Wainwright, B., Spikes, H., dan Kadiric, A. 2022. The effect of friction on micropitting. *Wear*, **Vol.488–489 Januari 2022**. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204130>
- University of Reading. 2013. *FWHM*. Diambil 27 Mei 2023, dari <https://www.reading.ac.uk/caf/mass-spectrometry-at-reading-caf/fwhm>
- Venables, J. A. 2000. Introduction to Surface and Thin Film Processes. Dalam *Introduction to Surface and Thin Film Processes*. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511755651>
- Vinila, V. S., dan Isac, J. 2022. Chapter 14 - Synthesis and structural studies of superconducting perovskite GdBa₂Ca₃Cu₄O_{10.5+δ} nanosystems. Dalam S. Thomas, N. Kalarikkal, & A. R. Abraham (Ed.), *Design, Fabrication, and Characterization of Multifunctional Nanomaterials* :. 319–341. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820558-7.00022-4>
- Warren, B. E. 1990. *X-ray diffraction*. New York: Dover Publications.
- Widyawati, F., Achyarsyah, M., dan Hidayat, E. 2014. *Analisis Sifat Mekanik Pada Material AISI 4140 dan CREUSABRO 8000 Untuk Aplikasi Gigi Bucket Produksi PT. POLMAN SWADAYA*. (Tugas Akhir), Jurusan Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung.
- Wilson, A. D., Nicholson, J. W., dan Prosser, H. J. 1987. *Surface coatings*. Berlin: Springer.
- World Steel Association. 2020. *Steel industry key facts*. Diambil 12 April 2023, dari <https://worldsteel.org/about-steel/steel-industry-facts/>
- Wuhrer, R., Kim, S., dan Yeung, W. Y. 1997. Effect of nitrogen partial pressure on the surface morphology and properties of reactive dc magnetron sputtered (Ti,Al)N coatings. *Scripta Materialia*, **Vol.37 No.8 Oktober 1997** : 1163–1169. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00239-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00239-X)
- Zhong, Y., Xia, X. H., Shi, F., Zhan, J. Y., Tu, J. P., dan Fan, H. J. (2015). Transition metal carbides and nitrides in energy storage and conversion. Dalam *Advanced Science*, **Vol.3 No.5**. <https://doi.org/10.1002/advs.201500286>