

PENGARUH KEAUSAN PULLEY TERHADAP KINERJA TRANSMISI CVT DAN EMISI GAS BUANG PADA KENDARAAN RINGAN

*The Effect Of Pulley Wear On Cvt Transmission Performance And Exhaust Emissions
In Light Vehicles*

Usman Syamsuddin¹, Anni Fatmawati², Randi Nugraha³

^{1,2} Dosen Jurusan Teknik Mesin, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,

³ Mahasiswa, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,

Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda

e-mail: ¹usmans@polnes.ac.id, ²anni_f@polnes.ac.id, ³randt_nug321@gmail.com

Info Artikel

Riwayat Artikel:

Diterima: 07/03/2026

Diterima dalam bentuk revisi:

18/04/2026

Diteima/publis: 25/05/2026

Kata Kunci

Keausan ,Pulley,
Transmisi CVT, Gas
buang, Kendaraan

Abstrak

Transmisi continuously variable transmission (CVT) bekerja melalui interaksi antara drive pulley, driven pulley, dan sabuk baja untuk menghasilkan rasio transmisi yang berubah secara kontinu. Keausan pada permukaan pulley berpotensi menurunkan kesesuaian kontak sabuk-pulley, mengubah output putaran, dan memengaruhi emisi gas buang kendaraan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh keausan pulley terhadap kinerja transmisi CVT dan emisi gas buang pada Kendaraan ringan. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan membandingkan kondisi pulley baik dan pulley aus pada putaran mesin 900, 1500, dan 2500 rpm selama 5 menit. Parameter kinerja transmisi diperoleh menggunakan scan tool melalui nilai driven pulley rpm dan driven pulley speed, sedangkan emisi gas buang diukur menggunakan exhaust gas analyzer. Hasil menunjukkan bahwa keausan pulley menurunkan rata-rata output driven pulley pada posisi maju (D1-D3) sebesar 14,05% pada 900 rpm, 31,88% pada 1500 rpm, dan 9,90% pada 2500 rpm. Rata-rata kecepatan driven pulley juga menurun sebesar 22,58%, 18,97%, dan 17,01% pada masing-masing putaran mesin. Pada pengujian emisi, kondisi pulley aus meningkatkan HC dan CO₂ pada 900 dan 2500 rpm, tetapi tidak menunjukkan tren linier pada 1500 rpm. Temuan ini menunjukkan bahwa keausan pulley lebih konsisten memengaruhi kinerja transmisi dibandingkan emisi gas buang pada kondisi uji tanpa beban. Deteksi dini kondisi pulley melalui pemantauan data scan tool dan perawatan CVT berkala diperlukan untuk mempertahankan respons transmisi dan mencegah kerusakan lanjutan.

Abstract

Continuously variable transmission (CVT) works through the interaction between the drive pulley, driven pulley, and steel belt to produce a continuously changing transmission ratio. Wear on the pulley surface has the potential to reduce the suitability of the belt-pulley contact, change the rotation output, and affect vehicle exhaust emissions. This study aims to analyze the effect of pulley wear on CVT transmission performance and exhaust emissions in light vehicles. Testing was carried out experimentally by comparing the condition of good pulleys and worn pulleys at engine speeds of 900, 1500, and 2500 rpm for 5 minutes. Transmission performance parameters were obtained using a scan tool through the values of driven pulley rpm and driven pulley speed, while exhaust emissions were measured using an exhaust gas analyzer. The results showed that pulley wear

reduced the average output of the driven pulley in the forward position (D1-D3) by 14.05% at 900 rpm, 31.88% at 1500 rpm, and 9.90% at 2500 rpm. The average driven pulley speed also decreased by 22.58%, 18.97%, and 17.01% at each engine speed. In emission testing, worn pulley conditions increased HC and CO₂ at 900 and 2500 rpm, but did not show a linear trend at 1500 rpm. These findings indicate that pulley wear more consistently affects transmission performance than exhaust emissions under no-load test conditions. Early detection of pulley conditions through scan tool data monitoring and regular CVT maintenance is necessary to maintain transmission response and prevent further damage..

PENDAHULUAN

Transmisi otomatis jenis continuously variable transmission (CVT) banyak digunakan pada kendaraan penumpang karena mampu mengubah rasio transmisi secara kontinu tanpa tahapan perpindahan gigi yang kaku. Karakteristik ini membedakan CVT dari transmisi bertingkat konvensional, karena perubahan rasio dapat berlangsung lebih halus dan memungkinkan mesin bekerja lebih dekat pada daerah operasi yang efisien [1]. Dalam konfigurasi CVT sabuk logam, sistem pemindah daya umumnya terdiri atas drive pulley, driven pulley, dan sabuk baja yang bekerja sebagai pasangan gesek untuk menyalurkan torsi dari mesin menuju roda penggerak. Perubahan diameter efektif pada kedua pulley menyebabkan rasio transmisi berubah secara kontinu sesuai kebutuhan beban, kecepatan kendaraan, dan putaran mesin [2]. Dengan kemampuan tersebut, CVT berpotensi meningkatkan kenyamanan berkendara, menjaga kontinuitas akselerasi, serta membantu pengendalian konsumsi bahan bakar pada kendaraan penumpang.

Keunggulan CVT sangat bergantung pada kualitas kontak antara sabuk dan permukaan pulley. Pada transmisi berbasis gesekan, gaya penjepit, koefisien gesek, pelumasan, kondisi permukaan pulley, serta besarnya slip menentukan kemampuan sistem dalam menyalurkan torsi secara stabil [3]. Kontak sabuk-pulley tidak hanya berfungsi sebagai jalur transfer daya, tetapi juga menjadi sumber utama rugi mekanis apabila terjadi ketidaksesuaian gaya penjepit atau perubahan kondisi permukaan. Kajian dinamik pada metal V-belt CVT

menunjukkan bahwa karakteristik gesekan, fleksibilitas pulley, dan interaksi inersia antara sabuk dan pulley dapat memengaruhi respons transien serta kestabilan rasio transmisi [4]. Selain itu, deformasi pulley juga dapat menyebabkan perubahan kontak lokal, peningkatan rugi torsi, dan penurunan efisiensi transmisi [5].

Keausan pulley menjadi salah satu faktor penting yang dapat memengaruhi performa CVT pada kendaraan yang telah digunakan dalam jangka panjang. Ketika permukaan pulley mengalami keausan, alur kontak sabuk dapat berubah sehingga diameter efektif, sudut kerja, dan distribusi gaya normal pada permukaan pulley tidak lagi berada pada kondisi ideal. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kecenderungan slip, menurunkan akurasi rasio transmisi, memperbesar rugi mekanis, serta menimbulkan getaran atau keterlambatan respons akselerasi. Studi pada metal V-belt CVT menunjukkan bahwa daerah micro-slip dan macro-slip memiliki pengaruh penting terhadap kestabilan transmisi daya, khususnya ketika sistem menerima getaran atau perubahan beban eksternal [6]. Oleh karena itu, perubahan fisik pada pulley tidak dapat dipandang hanya sebagai kerusakan komponen, tetapi juga sebagai faktor yang dapat mengubah karakteristik dinamis transmisi secara keseluruhan.

Kajian mengenai CVT selama ini banyak berfokus pada pemodelan dinamis, pengaturan gaya penjepit, efisiensi transmisi, dan strategi kendali untuk mengoptimalkan konsumsi energi. Pengaturan gaya penjepit yang terlalu tinggi

dapat meningkatkan rugi mekanis, sedangkan gaya penjepit yang terlalu rendah dapat menimbulkan slip berlebih dan mempercepat keausan komponen [7]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa deteksi macroslip dapat dilakukan menggunakan sinyal kecepatan pulley, sehingga parameter seperti kecepatan primary dan secondary pulley dapat menjadi indikator penting dalam pemantauan kondisi CVT [8]. Dengan demikian, data diagnostik seperti driven pulley rpm dan driven pulley speed berpotensi digunakan sebagai parameter praktis untuk membaca perubahan performa transmisi, terutama pada kendaraan yang mengalami degradasi komponen secara bertahap.

Hubungan antara performa transmisi dan emisi gas buang juga penting untuk dikaji karena perubahan rasio transmisi, slip, dan rugi mekanis dapat memengaruhi beban kerja mesin pada putaran tertentu. Optimasi efisiensi transmisi CVT dilaporkan dapat meningkatkan efisiensi powertrain dan menurunkan konsumsi energi karena mesin dapat dioperasikan pada daerah kerja yang lebih menguntungkan [9]. Di sisi lain, pemantauan berbasis on-board diagnostics (OBD) semakin banyak digunakan untuk membaca parameter operasi kendaraan, seperti putaran mesin, beban mesin, kecepatan kendaraan, dan data powertrain lain yang relevan untuk evaluasi performa [10]. Parameter emisi seperti CO, HC, CO₂, dan O₂ juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas pembakaran, karena perubahan kondisi operasi mesin dapat memengaruhi jumlah bahan bakar tidak terbakar, kesempurnaan pembakaran, serta kandungan oksigen sisa pada gas buang [11].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini menganalisis pengaruh keausan pulley terhadap kinerja transmisi CVT dan emisi gas buang pada Honda Jazz 2010. Fokus penelitian diarahkan pada perbandingan kondisi pulley baik dan pulley aus melalui parameter driven pulley rpm, driven pulley speed, serta emisi CO, HC, CO₂, dan O₂ pada variasi putaran

mesin 900, 1500, dan 2500 rpm. Penelitian ini penting karena tidak hanya menilai keausan pulley sebagai kerusakan mekanis, tetapi juga menghubungkannya dengan indikator diagnostik kendaraan dan karakteristik emisi gas buang. Dengan pendekatan tersebut, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai hubungan antara kondisi fisik komponen CVT, performa transmisi, dan respons pembakaran mesin pada kendaraan penumpang yang telah digunakan dalam jangka panjang..

TINJAUAN PUSTAKA

CVT bekerja dengan prinsip perubahan rasio secara kontinu melalui perubahan diameter efektif dua pulley yang dihubungkan oleh sabuk. Ketika posisi aksial pulley berubah, radius kontak sabuk pada drive pulley dan driven pulley ikut berubah sehingga rasio transmisi dapat disesuaikan tanpa perpindahan gigi bertahap [12]. Pada saat rasio berubah, sabuk mengalami kontak tekan dan gesek terhadap permukaan pulley, sehingga proses pemindahan daya sangat dipengaruhi oleh interaksi mekanis dan tribologis pada bidang kontak sabuk-pulley. Kondisi ini menyebabkan performa CVT sangat ditentukan oleh karakteristik gesekan, kekakuan sabuk, gaya penjepit, kualitas pelumasan, serta kemampuan sistem menjaga slip tetap dalam batas yang dapat dikendalikan [13]. Dalam transmisi berbasis gesekan, gaya penjepit yang terlalu kecil dapat menyebabkan slip berlebih, sedangkan gaya penjepit yang terlalu besar dapat meningkatkan rugi mekanis dan mempercepat pembebanan komponen [14].

Rugi daya pada CVT dapat berasal dari rugi torsi dan rugi kecepatan. Rugi torsi berkaitan dengan gesekan internal, deformasi, histeresis sabuk, serta gerak relatif antara elemen sabuk dan permukaan pulley [15]. Sementara itu, rugi kecepatan dapat terjadi akibat slip dan ketidaksesuaian gerak relatif pada kontak sabuk-pulley, terutama ketika gaya transmisi tidak lagi seimbang dengan kapasitas gesek yang tersedia [16]. Model rugi daya pada

transmisi V-belt juga menunjukkan bahwa frictional sliding, histeresis material, serta rugi akibat proses masuk dan keluar sabuk dari pulley dapat menjadi sumber utama kehilangan energi pada sistem CVT [17]. Oleh karena itu, keausan pulley tidak hanya menjadi persoalan perubahan geometri komponen, tetapi juga dapat mengubah kondisi tribologi, distribusi tekanan kontak, kestabilan slip, dan efisiensi pemindahan daya.

Dari sisi kendaraan, transmisi yang tidak mampu mempertahankan rasio kerja optimal dapat membuat mesin bekerja pada kondisi putaran dan beban yang kurang efisien. Perubahan beban kerja mesin tersebut berpotensi memengaruhi konsumsi bahan bakar dan pola pembakaran, terutama ketika slip transmisi menyebabkan sebagian energi mesin hilang sebelum diteruskan ke roda [18]. Kondisi pembakaran yang tidak optimal dapat meningkatkan emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO), karena kedua parameter tersebut berkaitan erat dengan pembakaran tidak sempurna dan oksidasi bahan bakar yang tidak sepenuhnya berlangsung di ruang bakar maupun sistem pascaperlakuan [19]. Namun, hubungan antara kondisi transmisi dan emisi gas buang tidak selalu linier, karena emisi juga dipengaruhi oleh beban mesin, temperatur kerja, rasio udara-bahan bakar, sistem injeksi, sensor oksigen, catalytic converter, serta kondisi pengujian [20]. Oleh karena itu, pengukuran emisi CO, HC, CO₂, dan O₂ perlu dibaca sebagai indikator respons sistem kendaraan secara keseluruhan, bukan hanya sebagai akibat langsung dari keausan pulley [21].

METODOLOGI PENELITIAN

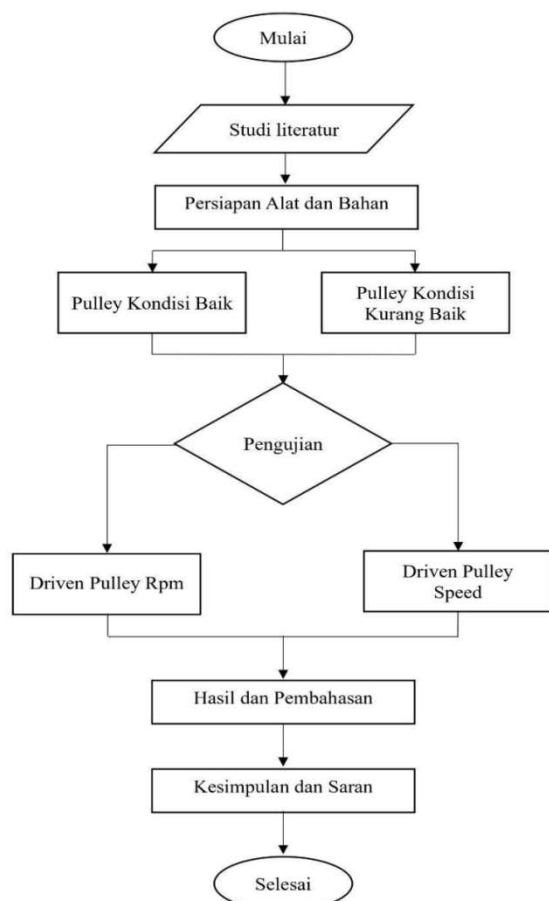
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen komparatif dengan membandingkan dua kondisi komponen transmisi CVT, yaitu pulley dalam kondisi baik dan pulley yang mengalami keausan. Objek penelitian adalah unit transmisi CVT Honda Jazz 2010. Pengujian dilakukan di Workshop Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Samarinda. Peralatan utama meliputi tool box, torque wrench, pulley

puller and installer, bearing puller and installer, torx and Allen wrench set, multimeter, scan tool, manual book, serta exhaust gas analyzer.

Pengambilan data dilakukan pada tiga variasi putaran mesin, yaitu 900, 1500, dan 2500 rpm. Setiap variasi diuji selama 5 menit dan dilakukan tiga kali pengulangan. Parameter kinerja transmisi yang diamati adalah driven pulley rpm dan driven pulley speed pada posisi transmisi D1, D2, D3, dan R. Untuk menjaga fokus analisis pada kinerja maju kendaraan, perhitungan ringkasan performa dalam artikel ini menggunakan rata-rata posisi D1-D3.

Kondisi fisik pulley dibedakan berdasarkan hasil pengukuran diameter dan geometri kerja pulley. Pada kondisi baik, diameter drive pulley dan driven pulley masing-masing adalah 149 mm dan 77 mm. Pada kondisi aus, diameter drive pulley dan driven pulley menurun menjadi 136 mm dan 64 mm. Selain itu, data kesimpulan pengujian menunjukkan perubahan kemiringan dan ketebalan pulley: drive pulley baik memiliki kemiringan 70 derajat dan ketebalan 20 mm, sedangkan drive pulley aus memiliki kemiringan 65 derajat dan ketebalan 6,3 mm; driven pulley baik memiliki kemiringan 86 derajat dan ketebalan 25 mm, sedangkan driven pulley aus memiliki kemiringan 72 derajat dan ketebalan 7,9 mm.

Emisi gas buang diukur pada kondisi pulley baik dan pulley aus dengan variasi putaran mesin yang sama. Parameter emisi yang dicatat meliputi CO, HC, CO₂, O₂, dan NO_x. Pada data pengujian, nilai NO_x tidak terbaca sehingga pembahasan difokuskan pada CO, HC, CO₂, dan O₂.



Gambar 1. Diagram Alir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ringkasan kondisi geometri pulley menunjukkan adanya penurunan diameter dan ketebalan yang cukup besar pada komponen aus. Penurunan ini mengindikasikan perubahan bidang kontak sabuk-pulley, sehingga berpotensi mengubah rasio efektif dan kestabilan perpindahan daya pada CVT.

Tabel 1. Perbandingan geometri pulley pada kondisi baik dan aus.

Kondisi	Drive pulley (mm)	Driven pulley (mm)	Sudut/tebal drive	Sudut/tebal driven
Baik	149	77	70 derajat / 20 mm	86 derajat / 25 mm
Aus	136	64	65 derajat / 6,3 mm	72 derajat / 7,9 mm

Hasil pengujian scan tool menunjukkan bahwa keausan pulley menurunkan output driven pulley pada seluruh variasi putaran mesin. Pada 900 rpm, rata-rata driven

pulley rpm posisi D1-D3 turun dari 688,00 rpm menjadi 591,33 rpm atau berkurang 14,05%. Pada 1500 rpm, penurunan menjadi paling besar, yaitu dari 3734,67 rpm menjadi 2544,00 rpm atau turun 31,88%. Pada 2500 rpm, output turun dari 6103,00 rpm menjadi 5498,67 rpm atau berkurang 9,90%. Penurunan ini memperlihatkan bahwa pulley aus tidak mampu mempertahankan output putaran secara setara dengan pulley baik, terutama pada putaran menengah.

Tabel 2. Rata-rata kinerja driven pulley pada posisi transmisi D1-D3

Putaran mesin	RPM baik	RPM aus	Penurunan RPM	Speed baik km/jam	Speed aus km/jam
900 rpm	688,00	591,33	14,05%	10,33	8,00
1500 rpm	3734,67	2544,00	31,88%	58,00	47,00
2500 rpm	6103,00	5498,67	9,90%	96,00	79,67

Penurunan driven pulley speed juga tampak konsisten pada seluruh putaran. Rata-rata kecepatan turun sebesar 22,58% pada 900 rpm, 18,97% pada 1500 rpm, dan 17,01% pada 2500 rpm. Secara teknis, kondisi ini dapat dijelaskan oleh perubahan geometri pulley dan meningkatnya potensi slip akibat bidang kontak yang tidak lagi presisi. Ketika kontak sabuk-pulley tidak stabil, sebagian energi putar dapat hilang sebagai panas, getaran, atau gerakan relatif yang tidak menghasilkan perpindahan daya efektif. Gejala ini sejalan dengan karakter CVT sebagai transmisi berbasis gesekan, di mana perubahan gaya kontak dan koefisien gesek dapat memengaruhi efisiensi transmisi [2]-[4].

Pada aspek emisi gas buang, hasil pengujian menunjukkan pola yang lebih kompleks dibandingkan parameter transmisi. Pada 900 rpm, pulley aus menghasilkan CO 0,006%, HC 0,056, dan CO₂ 0,023%, lebih tinggi dibandingkan pulley baik yang menghasilkan CO 0%, HC 0,043, dan CO₂ 0,010%. Pada 2500 rpm, nilai HC dan CO₂ juga lebih tinggi pada pulley aus. Namun, pada 1500 rpm, nilai HC dan CO₂ pada pulley aus justru lebih rendah dibandingkan kondisi pulley baik. Oleh karena itu, pengaruh pulley aus

terhadap emisi tidak dapat dinyatakan linier hanya berdasarkan pengujian tanpa beban dan tiga kali pengulangan.

Tabel 3. Ringkasan emisi gas buang pada kondisi pulley baik dan aus

Putaran (Rpm)	CO baik	CO aus	HC baik	HC aus	CO2 baik	CO2 aus
900	0%	0,006%	0,043	0,056	0,010%	0,023%
1500	0%	0%	0,023	0,013	0,013%	0,006%
2500	0%	0%	0,010	0,030	0,003%	0,023%

Kenaikan HC pada 900 dan 2500 rpm mengindikasikan adanya kecenderungan pembakaran yang kurang sempurna pada kondisi tertentu. Secara mekanis, pulley aus dapat menyebabkan transmisi memerlukan putaran atau respons mesin yang berbeda untuk menghasilkan output yang sama. Akan tetapi, karena pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban, emisi yang terukur juga sangat dipengaruhi oleh kestabilan idle, temperatur mesin, sensor oksigen, dan kerja catalytic converter. Dengan demikian, pembahasan emisi dalam penelitian ini perlu ditempatkan sebagai indikasi awal, bukan sebagai kesimpulan kausal tunggal.

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa pengaruh keausan pulley terhadap performa transmisi lebih kuat dan konsisten dibandingkan pengaruhnya terhadap emisi gas buang. Parameter driven pulley rpm dan driven pulley speed dapat digunakan sebagai indikator diagnostik awal karena mampu membedakan kondisi pulley baik dan aus pada seluruh variasi putaran mesin. Sementara itu, emisi gas buang memerlukan pengujian lanjutan dengan variasi beban, temperatur kerja, dan jumlah pengulangan yang lebih besar agar hubungan antara kondisi transmisi dan kualitas pembakaran dapat dikonfirmasi secara lebih kuat.

Implikasi Perawatan

Hasil penelitian menguatkan pentingnya perawatan preventif pada sistem CVT, terutama pemeriksaan kondisi pulley, penggantian oli CVT sesuai interval, pemeriksaan filter, pemeriksaan kebocoran, serta pemantauan temperatur transmisi. Perubahan diameter, ketebalan, atau sudut kerja pulley dapat menurunkan kinerja

output transmisi sebelum kerusakan dirasakan secara ekstrem oleh pengemudi.

Dalam praktik bengkel, penggunaan scan tool dapat diarahkan tidak hanya untuk membaca kode kerusakan, tetapi juga untuk memantau parameter operasi seperti driven pulley rpm, driven pulley speed, dan temperatur transmisi. Kombinasi pemeriksaan visual komponen dan data diagnostik dapat membantu teknisi menentukan apakah penurunan performa berasal dari pulley, sabuk, fluida, valve body, atau faktor pendukung lain

KESIMPULAN

Keausan pulley pada transmisi CVT Honda Jazz 2010 menyebabkan penurunan kinerja output transmisi. Berdasarkan rata-rata posisi maju D1-D3, driven pulley rpm turun sebesar 14,05% pada 900 rpm, 31,88% pada 1500 rpm, dan 9,90% pada 2500 rpm. Driven pulley speed juga turun sebesar 22,58%, 18,97%, dan 17,01% pada masing-masing putaran mesin.

Perubahan geometri pulley dari kondisi baik menuju kondisi aus menunjukkan penurunan diameter dan ketebalan yang besar. Kondisi ini berpotensi mengganggu kesesuaian kontak sabuk-pulley, meningkatkan slip, dan menurunkan efektivitas pemindahan daya pada CVT.

Pengaruh keausan pulley terhadap emisi gas buang belum menunjukkan tren yang sepenuhnya linier. Pada 900 dan 2500 rpm, kondisi pulley aus meningkatkan HC dan CO2 dibandingkan kondisi pulley baik, sedangkan pada 1500 rpm nilai emisi tertentu lebih rendah. Oleh karena itu, pengujian emisi perlu dilanjutkan dengan kondisi beban, temperatur kerja, dan jumlah pengulangan yang lebih terkontrol.

Parameter scan tool, khususnya driven pulley rpm dan driven pulley speed, layak digunakan sebagai indikator awal untuk mendeteksi penurunan performa CVT akibat keausan pulley. Perawatan preventif dan pemeriksaan berkala pada komponen pulley, sabuk, fluida CVT, serta sistem hidrolik diperlukan untuk menjaga keandalan transmisi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Srivastava and I. Haque, "A review on belt and chain continuously variable transmissions (CVT): Dynamics and control," *Mech. Mach. Theory*, vol. 44, no. 1, pp. 19–41, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.06.007.
- [2] G. Carbone, L. Mangialardi, B. Bonsen, C. Tursi, and P. A. Veenhuizen, "CVT dynamics: Theory and experiments," *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, no. 4, pp. 409–428, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.012.
- [3] K. Narita and M. Priest, "Metal-metal friction characteristics and the transmission efficiency of a metal V-belt-type continuously variable transmission," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 221, no. 1, pp. 11–26, Jan. 2007, doi: 10.1243/13506501JET169.
- [4] N. Srivastava and I. Haque, "Transient dynamics of metal V-belt CVT: Effects of band pack slip and friction characteristic," *Mech. Mach. Theory*, vol. 43, no. 4, pp. 459–479, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.04.005.
- [5] S. Akehurst, N. D. Vaughan, D. A. Parker, and D. Simner, "Modelling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission: Part 2: Pulley deflection losses and total torque loss validation," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 218, no. 11, pp. 1283–1293, Nov. 2004, doi: 10.1243/0954407042580101.
- [6] J. Ji, M. J. Jang, O. E. Kwon, M. J. Chai, and H. S. Kim, "Power transmission dynamics in micro and macro slip regions for a metal v-belt continuously variable transmission under external vibrations," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1119–1128, Dec. 2014, doi: 10.1007/s12239-014-0116-5.
- [7] B. Fu, T. Zhu, J. Liu, and X. Hu, "Research on Clamping Force Control of CVT for Electric Vehicles Based on Slip Characteristics," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2131, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22062131.
- [8] J. Ji, J. Park, O. Kwon, M. Chai, D. Lee, and H. Kim, "Macrosip detection and clamping force control for a metal V-belt continuously variable transmission," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 8, pp. 943–954, Jul. 2014, doi: 10.1177/0954407014522442.
- [9] H. Liu, L. Han, and Y. Cao, "Improving transmission efficiency and reducing energy consumption with automotive continuously variable transmission: A model prediction comprehensive optimization approach," *Appl. Energy*, vol. 274, p. 115303, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115303.
- [10] E. T. Michailidis, A. Panagiotopoulou, and A. Papadakis, "A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving," *Sensors*, vol. 25, no. 13, p. 4057, Jun. 2025, doi: 10.3390/s25134057.
- [11] R. Zhang *et al.*, "Exhaust Emissions from Gasoline Vehicles with Different Fuel Detergency and the Prediction Model Using Deep Learning," *Sensors*, vol. 23, no. 17, p. 7655, Sep. 2023, doi: 10.3390/s23177655.
- [12] H. Kim and J. Lee, "Analysis of belt behavior and slip characteristics for a metal V-belt CVT," *Mech. Mach. Theory*, vol. 29, no. 6, pp. 865–876, Aug. 1994, doi: 10.1016/0094-114X(94)90086-8.
- [13] K. Narita, "Tribological Properties of Metal V-Belt Type CVT Lubricant," *Adv. Tribol.*, vol. 2012, pp. 1–8, 2012, doi: 10.1155/2012/476028.

- [14] M. Van der Laan, M. Van Drogen, and A. Brandsma, "Improving Push Belt CVT Efficiency by Control Strategies Based on New Variator Wear Insight," Aug. 23, 2004. Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: <https://legacy.sae.org/publications/technical-papers/content/2004-40-0039/>
- [15] S. Akehurst, N. D. Vaughan, D. A. Parker, and D. Simner, "Modelling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission. Part 1: Torque losses due to band friction," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 218, no. 11, pp. 1269–1281, Nov. 2004, doi: 10.1243/0954407042580020.
- [16] S. Akehurst, N. D. Vaughan, D. A. Parker, and D. Simner, "Modelling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission. Part 3: Belt slip losses," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 218, no. 11, pp. 1295–1306, Nov. 2004, doi: 10.1243/0954407042580002.
- [17] L. Bertini, L. Carmignani, and F. Frendo, "Analytical model for the power losses in rubber V-belt continuously variable transmission (CVT)," *Mech. Mach. Theory*, vol. 78, pp. 289–306, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.016.
- [18] J. Wurm, M. Fitl, M. Gumpesberger, E. Väisänen, and C. Hochenauer, "Advanced heat transfer analysis of continuously variable transmissions (CVT)," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 545–553, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.007.
- [19] A. J. Kean, R. A. Harley, and G. R. Kendall, "Effects of Vehicle Speed and Engine Load on Motor Vehicle Emissions," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 17, pp. 3739–3746, Sep. 2003, doi: 10.1021/es0263588.
- [20] H. Mei *et al.*, "Characterization of Exhaust CO, HC and NOx Emissions from Light-Duty Vehicles under Real Driving Conditions," *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 9, p. 1125, Aug. 2021, doi: 10.3390/atmos12091125.
- [21] A. O. Hasan, A. Abu-Jrai, A. H. Al-Muhtaseb, A. Tsolakis, and H. Xu, "HC, CO and NOx emissions reduction efficiency of a prototype catalyst in gasoline bi-mode SI/HCCI engine," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 2410–2416, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.04.015.