

KARAKTERISASI KETAHANAN LELAH TAKIK ULIR *WHITWORTH* AKIBAT PEMBEBANAN PUNTIR DINAMIS PADA BAJA KARBON RENDAH

A Hasan Atho'ullah¹, Heri Yudiono²

^{1,2}Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang
E-mail: heri_yudiono@mail.unnes.ac.id

ABSTRACT

This study aims to analyze Whitworth thread's fatigue characterization due to dynamic twisting on low carbon steel. The research method uses experiments with pre-experimental design with the form of intact group comparison. The experimental group was specimens with Whitworth thread notch depth of 0.67 mm, 0.81 mm, and 1.16 mm. The control group was Whitworth threads with a notch depth of 0.9 mm. The study used low carbon steel with a carbon content of 0.12% wt. The dynamic torsion testing with a twisting angle of 5 reveals that the deeper the Whitworth thread notch, the lower the fatigue resistance. The fracture surface is visible due to dynamic torsion in the form of initial crack, crack propagation rate, and final crack.

Keywords: whitworth thread, dynamic twisting, fatigue, fracture surface area

ABSTRAK

Fenomena kegagalan lelah disebabkan oleh pola pembebanan dan bentuk takikan. Pola pembebanan terjadi karena puntir lentur dan puntir dinamis. Bentuk takikan diperlukan karena tuntutan desain, salah satunya adalah takik ulir *whitworth*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakterisasi ketahanan lelah ulir *whitworth* akibat pembebanan puntir dinamis pada baja karbon rendah. Metode penelitian menggunakan eksperimen dengan *pre-experimental design* dengan bentuk *intact-group comparison*. Kelompok eksperimen adalah spesimen dengan kedalaman takik ulir *whitworth* 0.67 mm, 0.81 mm, dan 1.16 mm. Kelompok kontrol dengan kedalaman takik ulir *whitworth* sebesar 0.9 mm. Penelitian menggunakan baja karbon rendah dengan kandungan karbon sebesar 0.12% wt. Hasil pengujian puntir dinamis mengungkapkan bahwa semakin dalam takik ulir *whitworth* maka ketahanan lelahnya semakin menurun. Bentuk penampang patah akibat pembebanan puntir dinamis berupa *initial crack*, *crack propagation rate* dan *final crack*.

Kata kunci: ulir *whitworth*, puntir dinamis, ketahanan lelah, bentuk penampang patah

PENDAHULUAN

Data yang dimiliki melalui pengujian tidak menjamin komponen bebas dari kegagalan, karena dalam proses perancangan disain pada umumnya menggunakan data tegangan statis. Kenyataan yang terjadi pada suatu komponen menunjukkan bahwa tegangan yang berfluktuasi disebabkan oleh getaran, semakin tinggi getaran maka waktu patah semakin cepat (Cesnik, 2014: 339-348), konsentrasi tegangan semakin tinggi maka semakin cepat patah (Agrawal *et al.*, 2014: 69-72, Mohamed *et al.*, 2018: 3262-3277) dan temperatur semakin tinggi maka ketahanan lelah semakin menurun (Hussain, 2016: 2324-2335).

Tegangan fluktuasi besarnya lebih kecil dari tegangan maksimum ataupun tegangan luluh (*yield*) yang diberikan pada beban konstan, karena terjadi dalam periode yang lama dan berbentuk siklus, maka komponen akan mengalami kegagalan (*failure*). Proses di mana tegangan terjadi hingga komponen mengalami kegagalan (*failure*) disebut dengan kelelahan (*fatigue*). Ketahanan lelah dapat ditingkatkan dengan menambahkan substansi seperti *methylene diphenyl diisocyanate* (MDI) (Chou *et al.*, 2019) atau diberikan perlakuan panas (Ha *et al.*, 2013: 389-393, La Rosa *et al.*, 2017: 1-12).

Salah satu komponen mesin yang mengalami kegagalan adalah baut. Baut berfungsi untuk menggabungkan komponen-komponen agar menjadi satu-kesatuan. Baut sering dijumpai di kendaraan bermotor, pesawat, produk telekomunikasi dan lain sebagainya. Baut memiliki jenis ulir yang berbentuk takik V, konsentrasi tegangan yang dimiliki lebih tinggi dibandingkan dengan takik U (Itoh *et al.*, 2013: 50-60). Semakin tinggi nilai konsentrasi tegangan, maka laju retakan akan semakin tinggi (Liu *et al.*, 2013: 1161-1169). Baut dapat mengalami kegagalan (*failure*) dalam fungsinya. Kegagalan yang sering dijumpai ketika motor dilakukan *service*, mesin-mesin kapal atau pabrik *maintenance* dan mesin-mesin pesawat yang *direpair*. Baut akan dibuka-tutup untuk mengecek komponen-komponen mesin yang *ditreatment*. Proses buka-tutup tersebut mengakibatkan baut mengalami pemuntiran secara dinamis. Proses ini terjadi secara terus-menerus hingga menjadi siklus. Siklus ini sangat mungkin menyebabkan baut patah. Patah dimulai pada permukaan baut karena permukaan sangat berpengaruh terhadap ketahanan lelah (Arola dan Williams, 2002: 923-930, Fatemi *et al.*, 2017). Semakin kasar permukaan, maka kemungkinan terjadinya retak awal semakin tinggi dan dapat terjadi dimanapun karena bersamaan dengan peningkatan ketahanan pada titik *crack* (Alang *et al.*, 2011: 160-163, Shang *et al.*, 2007: 2200-2207).

Baut akan mengalami kegagalan (*failure*) karena kelelahan (*fatigue*). Kegagalan baut

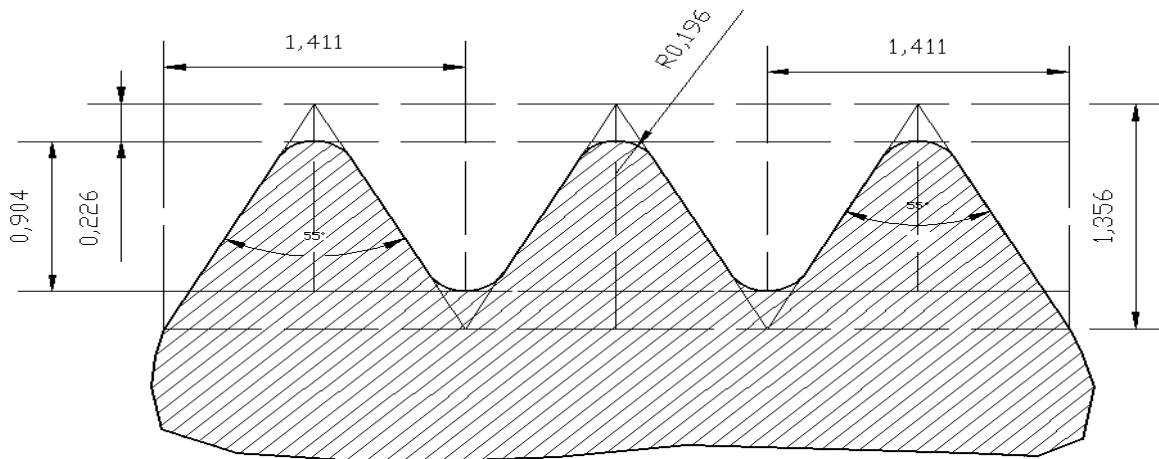
tersebut terjadi ketika baut tersebut dikencangkan atau dilepaskan setelah komponen beberapa kali *diservice* atau *direpair*. Kegagalan tersebut berupa patahan (*fracture*) baut di daerah ulir. Kegagalan baut bahkan bisa lebih cepat ketika baut dipasang terlalu kencang atau longgar ketika komponen sudah beberapa kali *diservice* atau *direpair*. Kegagalan tersebut berkaitan dengan ketahanan lelah puntir dinamis. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa ketahanan lelah takik ulir *withworth* akibat pembebanan puntir dinamis.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan *pre-experimental design* dengan bentuk *intact-group comparison*. Penelitian dibagi menjadi 2 kelompok, yaitu kelompok kontrol dan kelompok eksperimen. Kelompok kontrol terdiri dari spesimen yang diberi kedalaman takik ulir *withworth* 0,9 mm. Kelompok eksperimen terdiri dari spesimen dengan kedalaman takik ulir 0,67 mm; 0,81 mm; dan 1,16 mm. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah. Dimensi spesimen uji puntir dinamis menggunakan standar *JIS Z 2274 No. 1*. Proses uji fatik menggunakan mesin uji puntir dinamis seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Teknik analisis data menggunakan analisis statistik deskriptif.



Gambar 1. Mesin Uji Puntir Dinamis



Gambar 2. Dimensi Spesimen Standar JIS 2274 No. 1



Gambar 3. Spesimen Uji Puntir Dinamis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian komposisi dilakukan untuk memastikan kandungan komposisi yang terdapat

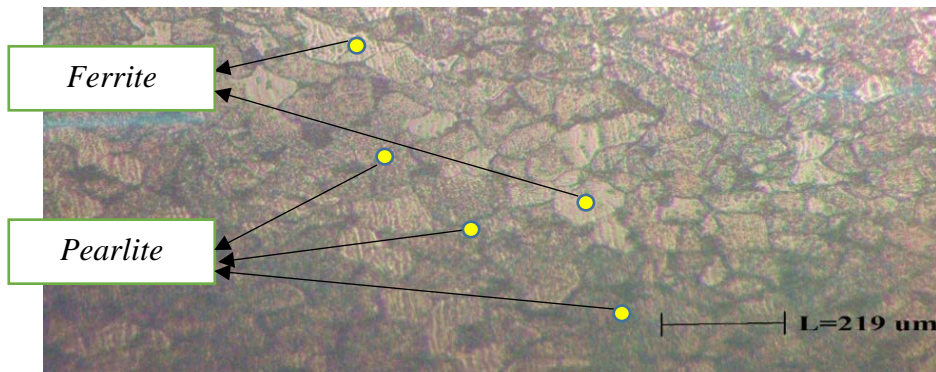
pada bahan baja karbon rendah. Hasil pengujian seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Raw Materials

Unsur	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)
Fe	98.01331	Co	0.01171
C	0.12192	Cu	0.00513
Si	0.09951	Nb	0.02898
Mn	0.55257	Ti	0.000000
P	0.00152	V	0.00000
S	0.03075	W	0.01760
Cr	0.01892	Pb	0.00649
Mo	0.02469	Cs	0.00794
Ni	0.04595	Zr	0.00294
Al	0.01007		

Tabel 1 menunjukkan bahwa kandungan Karbon (C) pada material specimen uji puntir dinamis sebesar 0,12% wt. Berdasarkan hasil pengujian komposisi tersebut, baja yang digunakan dalam pengujian termasuk baja karbon rendah karena mengandung karbon kurang dari 0.25% (Callister dan William, 2011).

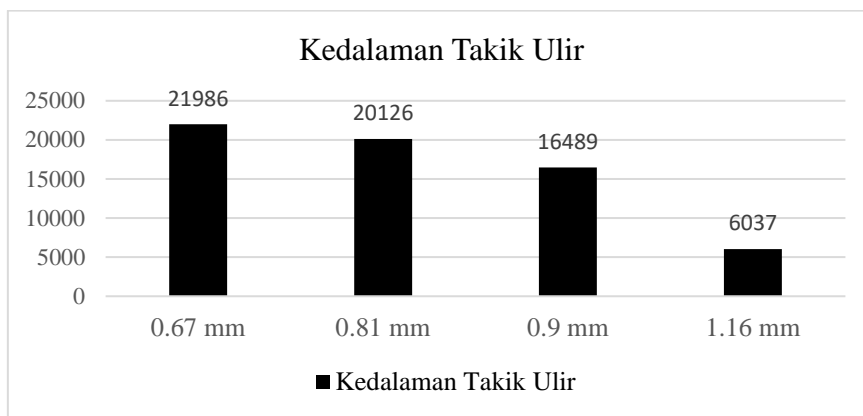
Pengujian struktur mikro dilakukan pada specimen uji bahan baja karbon rendah menggunakan mikroskop optic dengan perbesaran 500x. Hasil pengujian struktur mikro seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur Mikro Raw Material

Struktur mikro *raw material* tersebut tersusun atas 2 fasa utama yaitu kristal *ferrite* dan kristal *pearlite*. Kristal *ferrite* berwarna putih (terang) karena struktur *ferrite* terdiri dari logam besi murni (Fe), sedangkan kristal *pearlite* berwarna hitam (gelap) yang terdiri dari gabungan besi (Fe) dan karbon (C).

Pengujian menggunakan mesin puntir dinamis dengan besar sudut puntir sebesar 5° dengan putaran 300/menit dilakukan pada spesimen kelompok kontrol dan eksperimen. Hasil pengujian puntir dinamis seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

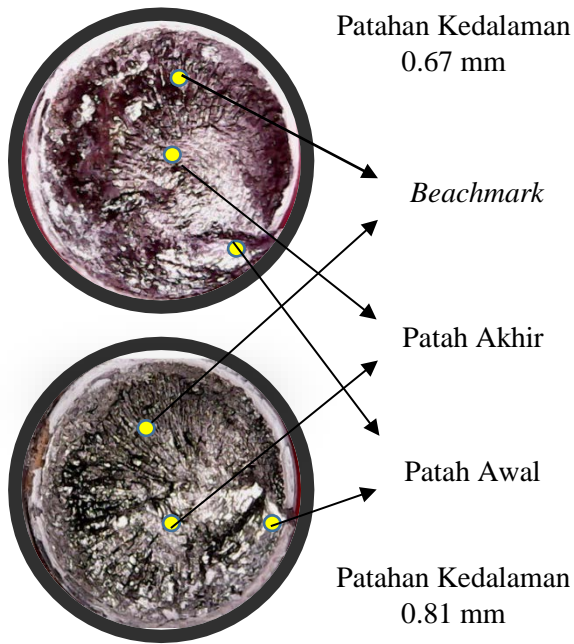


Gambar 5. Hasil Pengujian Puntir Dinamis

Hasil pengujian puntir dinamis menunjukkan bahwa ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 0,81 mm sebesar 20.126N mengalami kenaikan sebesar 22,06% dibandingkan dengan ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 0,9 mm sebesar 16.489N. Ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 0,67 mm sebesar 21.986N mengalami kenaikan sebesar 33,34% dibandingkan dengan ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 0,9 mm sebesar 16.489N. Ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 1,16 mm sebesar 6.037N mengalami penurunan sebesar 63,39% dibandingkan dengan ketahanan lelah ulir *withworth* dengan kedalaman 0,9 mm sebesar 16.489 N. Hasil

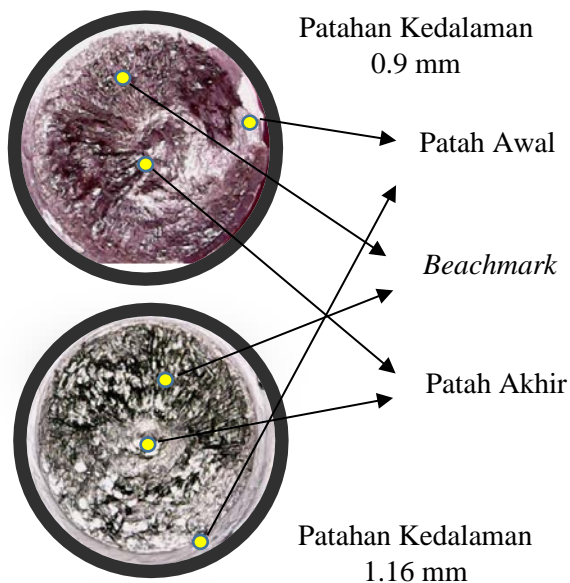
pengujian tersebut mengungkapkan bahwa semakin dalam takik ulir *withworth*, maka ketahanan lelahnya semakin menurun akibat pembebanan puntir dinamis.

Foto makro penampang patah dilakukan untuk mengetahui perilaku patahan hasil pengujian puntir dinamis. Perilaku patahan hasil pengujian puntir dinamis meliputi: *initial crack*, *beachmark*, dan *final fracture*. Hasil foto penampang patah seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Patahan Penampang dengan Kedalaman Ulir 0.67 mm dan 0.81 mm

Gambar 6 menunjukkan bahwa spesimen tersebut menunjukkan adanya tanda-tanda dari patah lelah. Tanda-tanda patah lelah tersebut ditunjukkan dengan adanya *beachmark* (perambatan retak), patah awal (*initial crack*) dan patah akhir (*final fracture*).



Gambar 7. Patahan Penampang dengan Kedalaman Ulir 0.9 mm dan 1.16 mm

Gambar 7 menunjukkan bahwa spesimen tersebut menunjukkan adanya tanda-tanda dari patah lelah. Tanda-tanda patah lelah tersebut ditunjukkan dengan adanya *beachmark* (perambatan retak), patah awal (*initial crack*) dan patah akhir (*final fracture*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman takik ulir *whitworth* pada material baja karbon rendah semakin tinggi tingkat kegagalan fatik akibat pembebanan puntir dinamis dengan sudut puntir 5° . Pada pembebanan puntir dinamis, tegangan yang bekerja lebih kecil daripada ketahanan tarik atau ketahanan luluh akibat pembebanan statis. Pembebanan dinamis terjadi secara terus menerus mengakibatkan spesimen mengalami kelelahan dan akhirnya terjadi kegagalan (*failure*). Kegagalan yang terjadi pada spesimen disebabkan oleh beberapa faktor seperti: konsentrasi tegangan, bentuk geometri, dan pembebanan.

Pemberian takik ulir pada spesimen menyebabkan geometri permukaan spesimen menjadi tidak rata. Permukaan yang tidak rata pada spesimen menyebabkan tegangan-tegangan yang bekerja pada spesimen tidak terdistribusi secara merata. Tegangan yang bekerja pada daerah takikan ulir akan meningkat, akibatnya tegangan maksimum didaerah tersebut lebih besar dari seharusnya. Lokasi dimana terjadinya peningkatan tegangan ini disebut dengan konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan sangat terpengaruh terhadap geometri permukaan spesimen (Noda *et al.*, 2005: 151-163). Ketahanan lelah menurun karena konsentrasi tegangan terjadi di setiap takik V di daerah ulir. Konsentrasi tegangan yang lebih dari satu tersebut saling berinteraksi dan mempengaruhi faktor konsentrasi tegangan. Interaksi akan semakin meningkatkan konsentrasi tegangan, akibatnya ketahanan lelah spesimen akan semakin menurun jika dibandingkan dengan pemberian 1 takikan (Yan *et al.*, 2016).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman ulir *whitworth*, ketahanan lelah pada spesimen semakin rendah. Penurunan ketahanan lelah disebabkan oleh

konsentrasi tegangan yang terjadi pada permukaan spesimen didaerah takik ulir. Konsentrasi tegangan merupakan faktor penting dalam kegagalan dimana konsentrasi tegangan mempengaruhi tegangan maksimal yang bekerja. Semakin dalam takik ulir *whitworth*, maka konsentrasi tegangan semakin besar. Peningkatan konsentrasi tegangan mengakibatkan tegangan maksimal yang bekerjapun semakin besar. Peningkatan tegangan maksimal inilah yang mengakibatkan spesimen dengan kedalaman takik ulir *whitworth* 1.16 mm memiliki ketahanan lelah terendah karena tegangan maksimal yang bekerja paling tinggi dengan rata-rata siklus sebesar 6.037 siklus. Hal ini berbalik pada spesimen dengan kedalaman takik ulir *whitworth* 0.67 mm dimana tegangan maksimal yang bekerja paling kecil sehingga rata-rata siklusnya sebesar 21.986 siklus. Ketahanan lelah akan menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman takik ulir (Araujo *et al.*, 2011: 1092-1100, Asad *et al.*, 2012: 94-98).

Selain faktor bentuk geometri, konsentrasi tegangan juga memiliki hubungan dengan jenis pembebanan yang diberikan pada spesimen. Jenis pembebanan mempengaruhi ketahanan dari spesimen itu yang berarti mempengaruhi ketahanan lelah dari spesimen. Konsentrasi tegangan yang terjadi pada jenis pembebanan puntir dinamis memiliki konsentrasi tegangan paling kecil dibandingkan dengan pembebanan *axial* dan pembebanan *bending* (Bader dan Njim, 2014: 819-827, Kamal *et al.*, 2012: 291-300). Data pengujian puntir dinamis menunjukkan adanya variasi kedalaman takik ulir *whitworth* berpengaruh terhadap ketahanan lelah pada baja karbon rendah, dimana semakin dalam takik ulir *whitworth* maka ketahanan lelah spesimen semakin menurun. Penurunan kekuatan lelah disebabkan oleh konsentrasi tegangan. Takikan yang diberikan pada ulir menyebabkan distribusi tegangan tidak merata di permukaan spesimen dan daerah ulir terjadi peningkatan tegangan. Takikan berupa ulir menyebabkan konsentrasi tegangan terjadi di beberapa titik dan saling berinteraksi sama lain sehingga tegangan di daerah ulir semakin tinggi. Konsentrasi

tegangan semakin meningkat dengan kedalaman takik ulir. Kedalaman takik ulir sangat mempengaruhi dari umur lelah material (Miranda *et al.*, 2019: 250-266)

Faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan lelah dalam penelitian ini ada beberapa hal. Salah satu faktor adalah besar sudut yang digunakan. Besar sudut mempengaruhi besarnya pembebanan yang terjadi pada spesimen. Semakin besar sudut yang digunakan, maka ketahanan lelah akan semakin menurun (Mamidi *et al.*, 2018: 1149-1151). Besar sudut takikan V pada spesimen sudah sesuai standar yaitu 60°. Besar sudut juga mempengaruhi ketahanan lelah dari spesimen ketika dilakukan uji puntir dinamis. Semakin kecil sudut takikan yang terbentuk, maka konsentrasi tegangan pada daerah takikan semakin besar (Rahman *et al.*, 2008: 3316-3327).

Pembebanan merupakan hal yang sangat penting dalam kelalahan. Pembebanan merupakan penyebab utama terjadinya kelelahan selain dengan konsentrasi tegangan. Pembebanan yang terjadi pada spesimen terjadi secara terus menerus dalam periode yang cukup lama sehingga spesimen mengalami kelelahan dan akhirnya patah. Jenis pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah puntir dinamis. Pembebanan dengan puntir dinamis mempengaruhi ketahanan lelah karena pembebanan merupakan salah satu faktor dari batas ketahanan material. Batas ketahanan mempunyai hubungan yang sebanding dengan kekuatan lelah material. Semakin besar batas ketahanan material, maka ketahanan lelah material juga semakin besar dan begitu juga sebaliknya. Pembebanan dengan tipe puntir dinamis memiliki pengaruh paling kecil terhadap ketahanan lelah pada spesimen bertakik dari pada jenis pembebanan yang lainnya (Bader dan Kadum, 2014: 1-8). Selain jenis pembebanan, kecepatan pembebanan juga mempengaruhi kekecambahan lelah dari spesimen. Kecepatan pembebanan berkaitan dengan frekuensi tegangan yang diberikan kepada spesimen. Semakin tinggi putarannya, maka ketahanan lelah semakin turun (Hendrickson, 2005).

Kecepatan pembebanan pada penelitian ini sebesar 300 rpm. Pembebanan ini termasuk besar karena siklus yang dihasilkan hingga spesimen patah terjadi dibawah 10^5 siklus. Jumlah siklus yang dibawah 10^5 menjadikan spesimen pada penelitian ini digolongkan ke *low cyclic fatigue*.

Pengamatan makroskopi dilakukan untuk mendapatkan bentuk permukaan patahan yang terjadi secara visual menggunakan kamera digital. Hasil foto makro semua spesimen setelah diuji puntir dinamis menunjukkan karakteristik dari patah lelah yang ditunjukkan oleh adanya patah awal, patah akhir dan garis pantai (*beachmark*) (Kwofie dan Chandler, 2001: 341-345). *Beachmark* menjadi hal terpenting yang menandakan bahwa material tersebut mengalami patah lelah. Pola *beachmarks* yang muncul menunjukkan spesimen mengalami pembebanan puntir dinamis.

Takikan berupa ulir *whitworth* meningkatkan konsentrasi tegangan didaerah takik. Konsentrasi tegangan menyebabkan *crack* muncul kemudian menjalar dari permukaan menuju kedalam (pusat) spesimen. Proses perambatan dari permukaan spesimen hingga kepusat menyebabkan terjadinya *beachmark*. Bentuk penampang cenderung kasar menunjukkan bahwa perambatan patah yang tinggi yang disebabkan oleh penggunaan sudut yang besar. Perambatan terjadi secara terus menerus selaras dengan tegangan yang bekerja. Ketika spesimen tidak kuat lagi menahan beban puntir dinamis, maka spesimen akan mengalami kegagalan.

SIMPULAN

Hasil penelitian tentang pengaruh kedalaman takik ulir *whitworth* terhadap ketahanan lelah puntir dinamis pada baja karbon rendah dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar kedalaman takik ulir *whitworth* pada material baja karbon rendah semakin tinggi tingkat kegagalan fatik akibat pembebanan puntir dinamis pada sudut puntir 5° .

2. Patahan penampang untuk semua variasi kedalaman takik menunjukkan fenomena yang sama. Fenomena tersebut menunjukkan karakteristik dari patah lelah berupa retak awal, *beachmark* dan patah akhir.

DAFTAR RUJUKAN

- Agrawal R, Uddanwadiker R, Padole P, Veerabu J. 2014. Effect of stress concentration in low cycle fatigue life prediction at high temperature. *Journal of Basic and Applied Engineering Research. Volume 1. Nomor 2, 69-72.*
- Alang NA, Razak N, Miskam A. 2011. Effect of surface roughness on fatigue life of notched carbon steel. *International Journal of Engineering & Technology (IJET-IJENS). Volume 11. Nomor 1, 160-163.*
- Araújo J, Dantas A, Castro F, Mamiya E, Ferreira J. 2011. On the characterization of the critical plane with a simple and fast alternative measure of the shear stress amplitude in multiaxial fatigue. *International Journal of Fatigue. Volume 33. Nomor 8, 1092-1100.*
- Arola D & Williams C. 2002. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces. *International Journal of Fatigue. Volume 24. Nomor 9, 923-930.*
- Asad A, Bjork T, Heinilla S. 2012. A finite element approach to predict the stress concentration factors in cold formed corners. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering IJMME-IJENS. Volume 12. Nomor 4, 94-98.*
- Bader Q & Kadum E. 2014. Effect of V notch shape on fatigue life in steel beam made of high carbon steel alloy AISI 1078. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). Volume 4. Nomor 7, 1-8.*

- Bader Q & Njim E. 2014. Experimental and numerical study of influence the loading mode on fatigue life in notched steel beam. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*. Volume 5. Nomor 7, 819-827.
- Callister Jr., William D. D. G. Rethwisch. 2011. *Material science and engineering an introduction*. John Wiley and Sons.
- Cesnik M & Slavic J. 2014. Vibrational fatigue and structural dynamics for harmonic and random loads. *Journal of Mechanical Engineering*. Volume 60. Nomor 5, 339-348.
- Chou TY, Tsai H, Yip MC. 2019. Preparation of CFRP with modified MWCNT to improve the mechanical properties and torsional fatigue of epoxy/polybenzoxazine copolymer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 118, 30-40.
- Fatemi A, Molaei R, Sharifimehr S, Shamsaei N, Phan N. 2017. Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect. *International Journal of Fatigue*.
- Ha J, Kim SK, Cobenca N, Kim H. 2013. Effect of R-phase heat treatment on torsional resistance and cyclic fatigue fracture. *JOE*. Volume 39. Nomor 3, 389-393.
- Hendrickson D. 2005. *Fatigue failure due to variable loading*. Department of Computer Science, Physics, and Engineering.
- Hussain F, Abdullah S, Nuawi M. Effect of temperature on fatigue life behaviour of aluminium alloy AA6061 using analytical approach. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. Volume 10. Nomor 3, 2324-2335.
- Itoh T, Sakane M, Ohsuga K. 2013. Multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Volume 110, 50-65.
- Kamal M, Rahman MM, Rahman AGA. 2012. Fatigue Life Evaluation of Suspension Knuckle using Multibody Simulation Technique. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 3:291-300.
- Kwofie S & Chandler H. 2001. Low cycle fatigue under tensile mean stresses where cyclic life extension occurs. *International Journal of Fatigue*. Volume 23. Nomor 4, 341-345.
- La Rosa G, Lo Savio F, Pedulla E, Rapisarda E. 2017. *A new torquemeter to measure the influence of heat-treatment on torsional resistance on NiTi endodontic instrumen*. Elsevier, 1-12.
- Liu J, Li J, Zhang Z-p. 2013. A three-parameter model for predicting fatigue life of ductile metals under constant amplitude multiaxial loading. *Journal of materials engineering and performance*. Volume 22. Nomor 4, 1161-1169.
- Mamidi NJ, Kumar J, Nethi R, Kadali V. 2018. Impact of notch depth on the fatigue life of AISI 316L austenitic stainless steel. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume 5. Nomor 9, 1149-1151.
- Miranda ACO, Antunes MA, Alarcon MVG, Meggiolaro MA, Castro JTP. 2019. Use of the stress gradient factor to estimate fatigue stress concentration factors Kf. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 206, 250-266.
- Mohamed SAN, Abdullah S, Arifin A, Ariffin AK, Padzi MM. 2016. Characterization of the biaxial fatigue behaviour on medium carbon steel using the strain-life approach.

- International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME). *Volume 13. Nomor 1*, 3262-3277.
- Noda N & Takase Y. 2005. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension and bending). *International Journal of Fatigue. Volume 28. Nomor 2*, 151-163.
- Rahman M.M, Ariffin A.K., Abdullah S., Noor M.M., Bakar R.A., Maleque M.A. 2008. Finite element based fatigue life prediction of cylinder head for two-stroke linear engine using stress-life approach. *Journal of Applied Sciences. Volume 8. Nomor 19*, 3316-3327.
- Shang D-G, Sun G-Q, Deng J, Yan C-L. 2007. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach. *International Journal of Fatigue*.
- Yan W, Xu Y, Wang K. 2016. Investigation of stress concentration and casing strength degradation caused by corrosion pits. *International Journal of Corrosion. Volume 2016*.