

Analisis Order untuk Deteksi *On-Line* Kondisi Pahat *CNC Milling* Menggunakan *MEMS Accelerometer*

Herianto dan Anis Arendra

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281 Indonesia
email: herianto@ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan alternatif *on-line Tool Condition Monitoring System* berbasis mikrokontroler sehingga harganya terjangkau. Deteksi kerusakan pahat dilakukan saat operasi pemakanan dengan mengukur getaran *fixture* benda kerja dan putaran *spindle* menggunakan *MEMS Accelerometer* dan *proximity sensor* berbasis *phototransistor*. Estimasi kondisi pahat dilakukan oleh *backpropagation neural network* dengan input fitur sinyal getaran. Fitur sinyal getaran domain waktu terdiri dari: standart deviasi, *skewness*, dan amplitudo percepatan, masing-masing dalam arah sumbu X, Y, Z. Fitur sinyal getaran domain frekuensi terdiri dari percepatan arah sumbu X, Y, Z pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-16 dari frekuensi putaran *spindle*. Analisis order dilakukan untuk menentukan frekuensi orde berapa yang digunakan. Akurasi *on-line* monitoring mencapai 95,83% dengan *false positif rate* sebesar 8,3% dan *false negatif rate* sebesar 0%.

Keyword: MEMS Accelerometer, Tool Condition Monitoring, Analisis order, Jaringan Syaraf Tiruan.

1. Pendahuluan

Dalam sistem pemesinan otomatis, mesin CNC beroperasi tanpa pengawasan operator. Sementara itu, peluang terjadinya keausan dan kerusakan pahat mendominasi modus kegagalan selama proses pemesinan CNC (Yesilyurt, 2006). Kious et. al. (2010) menyebutkan bahwa kerusakan pahat berkontribusi hingga 20% dari total *downtime* mesin perkakas CNC. Kerusakan pahat memberikan dampak langsung pada kualitas dan biaya pengerjaan produk.

Tool chipping adalah masalah yang umum ditemui pada proses *milling*, akibat gaya impak yang berulang. Kerusakan pahat lebih penting diawasi pada proses *milling* karena sifat pemotongannya yang tidak kontinyu (Baek et al., 2000). Kerusakan pahat merupakan modus kegagalan yang lebih berbahaya dari pada keausan pahat. Kerusakan pahat mengganggu proses pemesinan dan merusak kualitas produk. Untuk alasan ini, deteksi kerusakan pahat menjadi penting dalam menjaga kualitas proses pemesinan (Yesilyurt, 2006).

Penelitian-penelitian monitoring kerusakan pahat berdasarkan getaran oleh Jun & Suh (1999), Chen & Jen (2000), dan Huang et. al. (2011) menggunakan *accelerometer* berbasis elemen *piezo*. Badri et. al. (2010) menyebutkan bahwa penggunaan *piezoelectric accelerometer* sangat mahal, dan akan lebih menguntungkan bila

diganti dengan *MEMS accelerometer* yang berukuran ringkas dan ekonomis.

Sensor yang kurang terjangkau akan menghambat implementasi dan penguasaan teknologi TCM di Indonesia. Di sisi lain, maraknya perkembangan kompetisi robot tingkat nasional ikut menumbuhkan pasar komponen robotika. Sehingga sensor-sensor seperti *MEMS accelerometer* dapat diperoleh dengan mudah di pasar dalam negeri, dan membuka alternatif pengganti *industrial sensor*.

Tujuan penelitian ini membangun sistem TCM akurasi tinggi dengan teknologi yang terjangkau oleh industri dalam negeri. Hasil penelitian ini dapat diaplikasikan pada industri manufaktur untuk mendeteksi kerusakan pahat *end mill* tanpa mengganggu produktivitas mesin CNC.

Kerusakan pahat *end mill*

Kerusakan pahat yang digunakan dalam penelitian-penelitian deteksi kerusakan pahat *end-mill* dapat dibagi dalam dua kelompok. Pertama, pahat rusak secara artificial digunakan oleh Cao et al. (2008) dan Yesilyurt (2006). Kedua, pahat yang rusak secara alami digunakan dalam penelitian Huang et al. (2011). Kerusakan pahat secara artificial dibuat dengan cara mengerinda satu mata potong pahat *end mill*.

Fitur sinyal dan klasifikasi kondisi pahat

Dalam penelitian-penelitian deteksi kerusakan pahat *end-mill* pengolahan sinyal dapat dilakukan secara statistik (Jun & Suh, 1999; Chen & Jen, 2000; Baek et al., 2000), transformasi *Fourier* (Chen & Jen, 2000; Baek et al., 2000), transformasi *wavelet* (Yesilyurt, 2006; Cao et al., 2008; Huang et al., 2011). Fitur-fitur sinyal yang umum digunakan untuk mencirikan kerusakan pahat adalah: Fitur *maximum peak force* dalam satu putaran *spindle* (Huang & Chen, 1998). Fitur rerata, rms dan deviasi standar atau varian sinyal dalam domain waktu (Chen & Jen, 2000; Huang et al., 2008). Fitur jumlah *local minima* dan *local maxima* dalam spektrum frekuensi (Chen & Jen, 2000). Fitur *band energy* (Baek et al., 2000). Fitur koefisien *wavelet* (Cao et al., 2008; Huang et al., 2011). Fitur *cepstrum* (Huang et al., 2008).

Sistem pendukung keputusan pada penelitian terdahulu menggunakan *fuzzy logic* (Huang & Chen, 1998), *statistical process control* (Jun & Suh, 1999), jaringan syaraf tiruan (Chen & Jen, 2000; Baek et al., 2000), *Fisher linear discriminant classifier* (Huang et al. 2011), atau menggunakan *manual threshold* (Yesilyurt, 2006; Cao et al., 2008; Huang et al., 2008).

2. Metode Usulan

Sistem TCM dibangun untuk deteksi *on-line* kerusakan pahat *end mill* berdasarkan getaran *fixture* benda kerja dan posisi *spindle* menggunakan sensor-sensor *MEMS triaxial accelerometer* dan *optical proximity sensor* berbasis *phototransistor*. Kriteria kerusakan pahat menggunakan $VB_{max} = 0,6$ mm untuk pahat HSS yang mengalami *chipping*, mengacu pada rekomendasi ISO. JST digunakan dalam penelitian ini untuk mengenali dan mengklasifikasikan kondisi pahat berdasarkan gabungan data fitur-fitur sinyal getaran. Sistem TCM dalam penelitian ini hanya mendapatkan input informasi dari sensor.

Deteksi kerusakan pahat

Kerusakan pahat dideteksi dengan membandingkan fitur yang diekstrak dari sinyal getaran. Fitur domain waktu yang diekstrak adalah standar deviasi sebaran dataset getaran arah sumbu X,Y,Z (Std_x ; Std_y ; Std_z), *skewness* dataset getaran sumbu X,Y,Z ($Skew_x$; $Skew_y$; $Skew_z$), dan amplitudo getaran sumbu X,Y,Z (Amp_x ; Amp_y ; Amp_z). Fitur domain waktu yang diekstrak adalah percepatan sumbu X pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-12, dan ke-16 dari frekuensi putaran *spindle* (X_{4th} ; X_{8th} ; X_{12th} ; X_{16th}), percepatan sumbu Y pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-12, dan ke-16 dari frekuensi putaran *spindle* (Y_{4th} ; Y_{8th} ; Y_{12th} ; Y_{16th}), percepatan sumbu Z pada

frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-12, dan ke-16 dari frekuensi putaran *spindle* (Z_{4th} ; Z_{8th} ; Z_{12th} ; Z_{16th}),

Gabungan fitur-fitur sinyal tersebut digunakan sebagai input JST. JST dilatih untuk mengenali fitur-fitur sinyal yang berasal dari pahat rusak atau pahat normal. Fitur-fitur input diseleksi supaya mencapai akurasi klasifikasi tinggi dengan ukuran JST yang cukup kecil. Ukuran JST yang kecil diharapkan supaya generalisasi *classifier* JST cukup baik untuk mengenali pola-pola getaran diluar pola-pola getaran yang telah diajarkan. Dengan kata lain, ukuran JST yang kecil akan mengurangi kemungkinan *overtrained*.

Setup percobaan

Mesin yang digunakan adalah mini CNC *milling* HERCUS V300 yang telah di-*retrofit* menggunakan *controller* CNC berbasis PC. Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah *mild steel* ekstrusi dengan ukuran 50 mm × 50 mm × 160 mm. Operasi pemesinan yang dikerjakan dalam penelitian adalah *end milling* dengan parameter pemotongan sesuai tabel 1.



Gambar 1. Setup percobaan, benda kerja dan pahat yang digunakan dalam penelitian

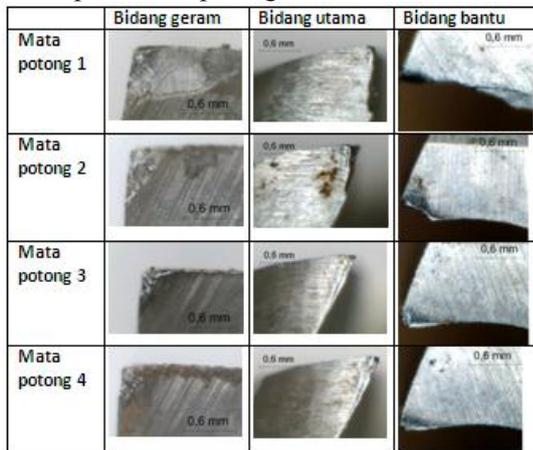
Peralatan yang digunakan untuk sistem TCM adalah *MEMS triaxial Accelerometer* MMA7361, *DT-SENSE Line Tracking SFH 4 Sensor* berbasis *phototransistor* SFH-300, *DAQ* NI USB-6008, *Arduino UNO* dengan alarm LED, *Device driver* NIDAQmx 9.6, *Matlab* 2010a, dan komputer untuk menjalankan aplikasi TCM.

Pada penelitian ini kami menggunakan komponen-komponen yang mudah didapatkan di pasaran dan tentunya dengan harga yang terjangkau.

Tabel 1. Treatment percobaan

Pahat	Bahan : HSS Flute : 4 Diameter : 12mm Panjang : 80mm
Benda kerja	Mild Steel
Operasi pemotongan	End Milling
Spindle speed	550; 650; 750 rpm
Feed per tooth	0,02; 0,05; 0,08 mm
Kedalaman potong	0,2 mm
Lebar pemotongan	6 mm
Metode pemakanan	Up Milling tanpa pendingin

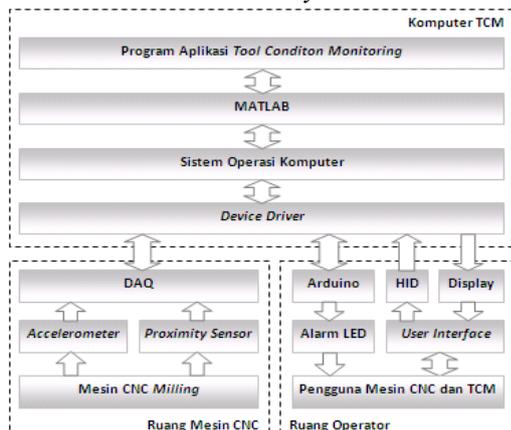
Pahat yang digunakan adalah *HSS four flute end mill* diameter 12 mm. Pahat normal menggunakan pahat baru. Pahat rusak menggunakan pahat yang telah *chipping* pada mata potongnya. Detail kerusakan mata potong pahat dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Detail mata potong pahat rusak

3. Hasil Percobaan

Arsitektur *software* dan *hardware* sistem TCM terdiri 6 *layer* (gambar 3). Keenam *layer* tersebut adalah: *Layer* Program aplikasi TCM. *Layer* aplikasi MATLAB. *Layer* sistem operasi. *Device driver layer*. *Hardware layer*. Dan yang terakhir adalah *transducer layer*.



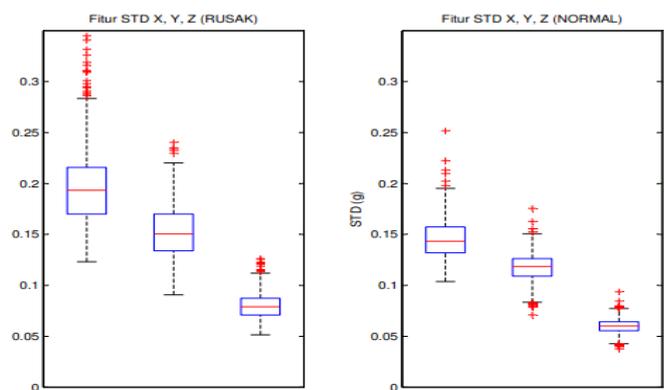
Gambar 3. Arsitektur sistem TCM

Sistem TCM dikembangkan dalam lima modus sesuai kebutuhan dalam metode penelitian ini. Modus perekaman data getaran digunakan untuk mengambil data getaran mesin sesuai *treatment* percobaan. Modus memutar ulang data rekaman berguna untuk pengamatan sinyal di domain waktu dan domain frekuensi. Pengamatan ini diperlukan untuk mencari fitur yang membedakan sinyal dari pahat rusak dengan sinyal dari pahat normal. Modus ketiga adalah modus pengembangan dan pelatihan jaringan syaraf tiruan. Modus ini digunakan dalam *iterative trial* untuk mencapai akurasi *classifier* tinggi dilakukan dengan memilih fitur sinyal untuk input JST, menentukan jumlah *hidden layer* dan jumlah *neuron*. Untuk menguji kinerja sistem TCM, digunakan modus pengujian TCM. Dan yang terakhir adalah modus aplikasi *on-line tool condition monitoring*.

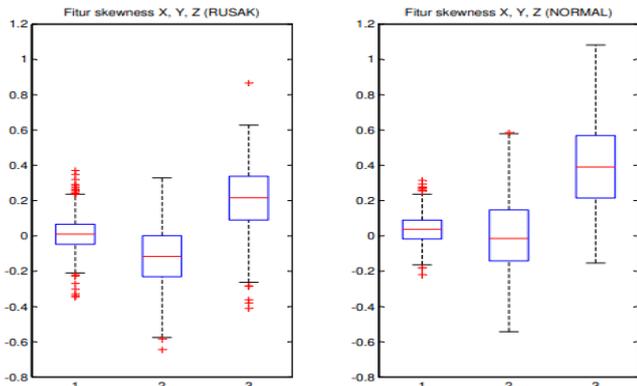
Analisis sinyal

Signal conditioning dilakukan sebelum mengolah sinyal untuk mengurangi *noise* pada frekuensi 50 Hz, 100 Hz dan 200Hz. Filter yang tepat untuk mengurangi *noise* tersebut adalah *notch filter*.

Gambar 4 adalah *boxplot* fitur standar deviasi, terlihat bahwa *first quartile* sebaran data fitur Std_x pahat rusak terletak di atas *third quartile* sebaran data fitur Std_x pahat normal. Hal ini berarti lebih dari 75% data fitur Std_x pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur Std_x pahat normal. Fenomena yang sama juga Nampak pada fitur Std_y dan Std_z, sehingga dapat ditarik kesimpulan yang serupa. Lebih dari 75% data fitur Std_y pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur Std_y pahat normal. Dan lebih dari 75% data fitur Std_z pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur Std_z pahat normal.



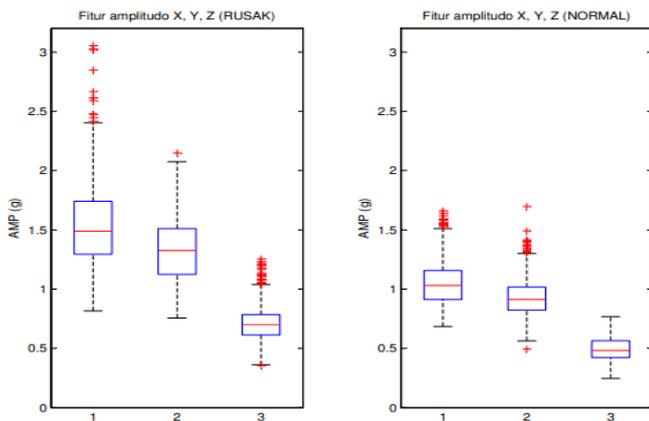
Gambar 4. Fitur standar deviasi X, Y, Z dari pahat rusak dan pahat normal



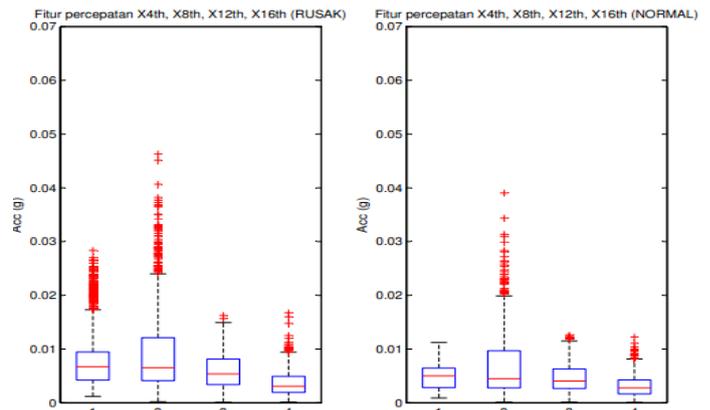
Gambar 5. Fitur skewness X, Y, Z dari pahat rusak dan pahat normal

Untuk fitur *skewness* (gambar 5), pola sebaran data fitur *skewness* pahat rusak dan *skewness* pahat normal tampak berada pada *range* yang sama. Hanya terlihat bahwa median *Skewz* pahat normal lebih positif dari *Skewz* pahat rusak, dan median *Skewy* pahat rusak lebih negatif dari *Skewy* pahat normal.

Pada gambar 6, *first quartile* sebaran data fitur *Ampx* pahat rusak terletak di atas *third quartile* sebaran data fitur *Ampx* pahat normal. Hal ini berarti lebih dari 75% data fitur *Ampx* pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur *Ampx* pahat normal. Fenomena yang sama juga nampak pada fitur *Ampy* dan *Ampz*, sehingga dapat ditarik kesimpulan yang serupa. Lebih dari 75% data fitur *Ampy* pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur *Ampy* pahat normal. Dan lebih dari 75% data fitur *Ampz* pahat rusak bersifat *mutually exclusive* dengan data fitur *Ampz* pahat normal.

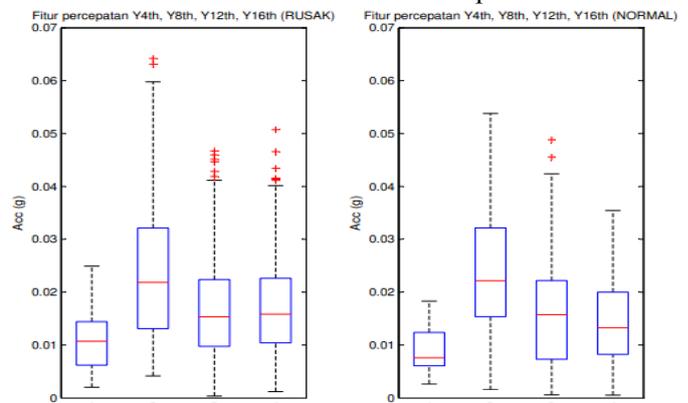


Gambar 6. Fitur amplitudo X, Y, Z dari pahat rusak dan pahat normal



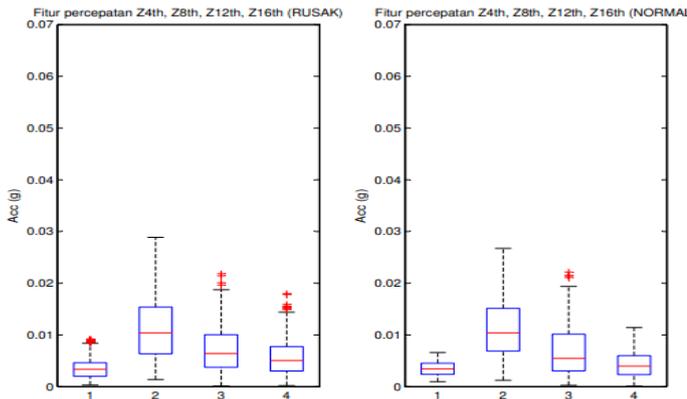
Gambar 7. Fitur percepatan pada X4th, X8th, X12th, X16th dari pahat rusak dan pahat normal

Gambar 7 adalah *Boxplot* percepatan sumbu X pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-12, ke-16, dari frekuensi putaran *spindle*. Ciri-ciri yang teramati pada plot data pahat rusak adalah median X4th pahat rusak dan median X8th pahat rusak terletak pada level yang kurang lebih sama dan lebih tinggi dari level median X12th pahat rusak. Pada plot data pahat normal, median X8th pahat normal dan median X12th pahat normal terletak pada level yang kurang lebih sama dan lebih rendah dari level median X4th pahat normal.



Gambar 8. Fitur percepatan pada Y4th, Y8th, Y12th, Y16th dari pahat rusak dan pahat normal

Gambar 8 adalah *Boxplot* percepatan sumbu Y pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-12, ke-16, dari frekuensi putaran *spindle*. Ciri-ciri yang membedakan plot data pahat rusak dengan plot data pahat normal adalah level median Y12th lebih rendah dari level median Y16th pada plot data pahat rusak, sebaliknya pada plot data pahat normal level median Y12th lebih tinggi dari level median Y16th.



Gambar 9. Fitur percepatan pada Z4th, Z8th, Z12th, Z16th dari pahat rusak dan pahat normal

Gambar 9 adalah *Boxplot* percepatan sumbu Z pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-

12, ke-16, dari frekuensi putaran *spindle*. Tidak ada ciri-ciri menonjol yang dapat membedakan plot data pahat rusak dengan plot data pahat normal. Fitur Z4th, Z8th, Z12th, Z16th pahat rusak dan pahat normal terletak pada *range* yang kurang lebih sama.

Jaringan syaraf tiruan

Iterasi pelatihan JST dilakukan dengan memilih variasi input fitur-fitur domain waktu dan domain frekuensi dan variasi jumlah *neuron* untuk mencari gabungan input fitur domain waktu dan domain frekuensi yang mampu memberikan akurasi *classifier* tinggi, namun dengan ukuran jaringan syaraf yang kecil. Beberapa hasil iterasi pelatihan JST ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Data kinerja uji-coba JST dengan variasi ukuran dan variasi input fitur sinyal

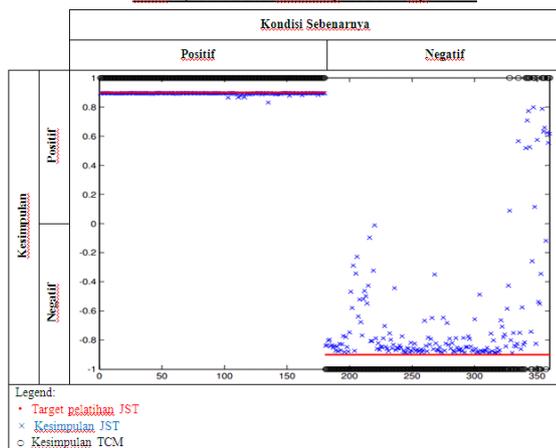
No.	Input	Neuron	Akurasi (%)	False Positive Rate (%)	False Negative Rate (%)
1.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy Stdz skewz ampz X4th X8th X12th X16th Y4th Y8th Y12th Y16th Z4th Z8th Z12th Z16th	21 – 10 – 1	98,33 ⁽²⁾	2,2	1,11 ⁽⁴⁾
2.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy X4th X8th X12th X16th Y4th Y8th Y12th Y16th Z4th Z8th Z12th Z16th	18 – 10 – 1	98,33 ⁽²⁾	0 ⁽³⁾	3,23
3.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy X4th X8th X12th X16th Y4th Y8th Y12th Y16th Z4th Z8th Z12th Z16th	18 – 9 – 1	97,22	2,25	3,3
4.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy X4th X8th X16th Y4th Y8th Y16th Z4th Z8th Z16th	15 – 10 – 1	97,22	3,3	2,25
5.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy X4th X8th X16th Y4th Y8th Y16th Z4th Z8th Z16th	15 – 20 – 1	97,22	3,3	2,25
6.	Stdx skewx ampx Stdy skewy ampy Stdz skewz ampz X4th X8th X16th Y4th Y8th Y16th Z4th Z8th Z16th	18 – 2 – 1 (1)	97,77	2,22	2,22

- (1). Ukuran jaringan terkecil
- (2). Akurasi terbaik.
- (3). *False positive rate* terendah.
- (4). *False negative rate* terendah.

4. Kinerja Sistem TCM

Hasil estimasi kondisi pahat oleh sistem TCM menggunakan jaringan syaraf ke-6 dari tabel 2 terhadap seluruh data uji *on-line* sebanyak 360 *sample* diplotkan dalam *confusion matrix* 2x2. Diperoleh akurasi sebesar $345/360 = 95,83\%$, *false negative rate* $0/180 = 0,0\%$, dan *false positive rate* $15/180 = 8,3\%$.

Hasil Inference TCM Terhadap 360 Data Uji *on-line*

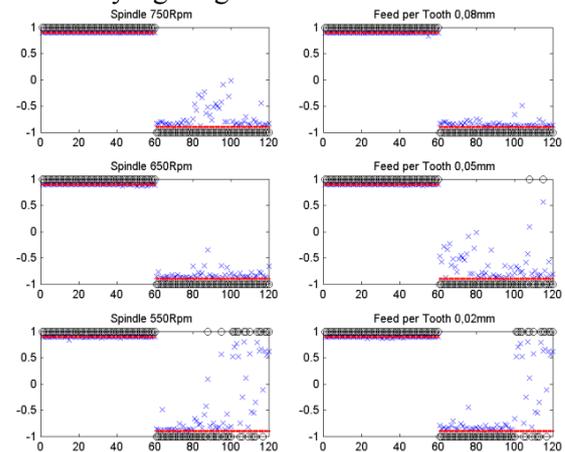


Gambar 10. Plot hasil estimasi TCM dalam *confusion matrix* 2x2

Gambar 11 kolom kiri menunjukkan plot hasil estimasi TCM terhadap *treatment* penelitian dengan putaran *spindle* tetap. Terlihat pada *treatment* putaran *spindle* 750 rpm dan 650 rpm tidak ada kesalahan estimasi kondisi pahat oleh TCM dan akurasi TCM pada *treatment* penelitian tersebut mencapai 100%. Tetapi pada *treatment* putaran *spindle* 550 rpm ditemukan 15 kesalahan estimasi berupa *false positive*, sehingga akurasi TCM turun menjadi 87,5% (105/120). Diduga turunnya akurasi pada putaran *spindle* 550 rpm akibat frekuensi fitur X8th berimpit dengan frekuensi natural sistem dalam arah X, sehingga menyebabkan inkonsistensi fitur X8th pada putaran *spindle* 550 rpm.

Gambar 11 kolom kanan menunjukkan plot hasil estimasi TCM terhadap *treatment* penelitian dengan *Feed per Tooth* tetap. Terlihat pada perlakuan *Feed per Tooth* 0,08 mm tidak ada kesalahan estimasi kondisi pahat oleh TCM dan akurasi TCM pada *treatment* penelitian tersebut mencapai 100%. Tetapi pada perlakuan *Feed per Tooth* 0,05 mm ditemukan 2 kejadian *false positive* sehingga akurasi TCM turun menjadi 98,3% (118/120). Pada perlakuan *Feed per Tooth* 0,02 mm ditemukan 13 kejadian *false positive* sehingga akurasi TCM turun menjadi 89,17%

(107/120). Turunnya akurasi pada *Feed per Tooth* 0,02 mm diduga akibat proses *rubbing* yang lebih mendominasi daripada proses *cutting* pada *Feed per Tooth* yang sangat kecil.



Gambar 11. Plot hasil estimasi TCM terhadap *treatment* penelitian dengan putaran *spindle* tetap dan *Feed per Tooth* tetap

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan sistem TCM terjangkau menggunakan MEMS *Accelerometer* dan *proximity sensor* berbasis *phototransistor*, menggabungkan fitur informasi yang didapat dari sensor-sensor oleh jaringan syaraf tiruan, memberikan estimasi kondisi pahat saat operasi pemotongan secara *on-line*, dan memicu lampu alarm peringatan saat terindikasi pahat telah rusak.

Jaringan Syaraf Tiruan *feedforward backpropagation* dengan *hidden layer* tunggal mampu mengklasifikasikan kondisi pahat normal dan kondisi pahat rusak berdasarkan gabungan informasi deviasi standar, *skewness*, amplitudo percepatan X, Y, Z, dan informasi percepatan X, Y, Z, pada frekuensi kelipatan ke-4, ke-8, ke-16 dari frekuensi putaran *spindle*.

Kinerja pengujian *on-line* arsitektur jaringan syaraf 18 – 2 – 1 mencapai agregat akurasi 95,83% dengan *false positive rate* 8,3% dan *false negative rate* 0%.

Referensi

- Badri, A. E., Sinha, J. K., & Albarbar, A. (2010). A Typical Filter Design to Improve The Measured Signals from MEMS Accelerometer. *Measurement*, 43(10), 1425–1430.

- Baek, D. K., Ko, T. J., & Kim, H. S. (2000). Real Time Monitoring of Tool Breakage in a Milling Operation using a Digital Signal Processor. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3), 266–272.
- Cao, H., Chen, X., Zi, Y., Ding, F., Chen, H., Tan, J., & He, Z. (2008). End milling tool breakage detection using lifting scheme and Mahalanobis distance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(2), 141–151.
- Chen, S., & Jen, Y. W. (2000). Data Fusion Neural Network for Tool Condition Monitoring in CNC Milling Machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 381–400.
- Huang, C., Lu, M., Lu, C., & Hsu, Y. (2011). Study of Spindle Vibration Signals for Tool Breakage Monitoring in Micro-Drilling. *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation* (pp. 1130–1134). Taipei: IEEE.
- Huang, P. T., & Chen, J. C. (1998). Fuzzy Logic-Base Tool Breakage Detecting System in End Milling Operations. *Proceedings of the 23rd International Conference on Computers and Industrial Engineering* (Vol. 35, pp. 37–40). Elsevier Science.
- Huang, S., Zhang, D. H., Leong, W. Y., Chan, H. L., Goh, K. M., & Zhang, J. B. (2008). Detecting Tool Breakage Using Accelerometer in Ball-nose End Milling. *Proceedings of the 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision* (pp. 17–20). Hanoi: IEEE.
- Jun, C., & Suh, S. (1999). Statistical Tool Breakage Detection Schemes Based on Vibration Signals in NC Milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 1733–1746.
- Kious, M., Ouahabi, A., Boudraa, M., Serra, R., & Cheknane, A. (2010). Detection Process Approach of Tool Wear in High Speed Milling. *Measurement*, 43(10), 1439–1446.
- Yesilyurt, I. (2006). End Mill Breakage Detection using Mean Frequency Analysis of Scalogram. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 450–458.