

PEMOTONGAN DENGAN MENGGUNAKAN ABRASIVE WATERJET

Satryo Soemantri Brodjonegoro
Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin
Institut Teknologi Bandung

Yudhi P. Nugroho dan Sutrimono
Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin
Institut Teknologi Bandung

Ringkasan

Pemotongan secara non-konvensional diperlukan untuk dapat menghasilkan produk dengan kualitas tertentu yang relatif sukar diproses secara konvensional. Disamping itu pemotongan secara non-konvensional akan memberikan keuntungan dalam hal kemudahan proses pemotongan dan fleksibilitas. Dalam makalah ini akan dibahas mengenai teori pemotongan non-konvensional dengan menggunakan abrasive waterjet, perancangan dan pembuatan alat potong serta pengujian kemampuannya.

Summary

Non-conventional cutting is required for quality production which is usually difficult to be achieved by conventional cutting. Besides non-conventional cutting provides advantages in simplified cutting process and its flexibility. This paper describes the theory of non-conventional cutting process using abrasive waterjet, the design and manufacturing of the cutter and also the performance testing.

1. PENDAHULUAN

Proses pemotongan non-konvensional diteliti dan dikembangkan agar mampu melakukan proses pemotongan terhadap material yang sangat keras, material yang sangat lunak, komposit multi-material dengan meminimumkan tegangan akibat deformasi, efek termal pada material sehingga diperoleh kualitas yang baik. Dengan proses pemotongan tersebut dimungkinkan pemotongan yang *omni-directional*, dapat diotomatisasikan dengan mudah dan pemotongan tanpa getaran. Salah satu metode pemotongan non-konvensional yang cukup sederhana adalah dengan menggunakan fluida bertekanan tinggi. Untuk meningkatkan efektivitas pemotongan, digunakan partikel abrasif sebagai campuran fluida yang disemprotkan melalui nosel. Metode pemotongan yang menggunakan campuran fluida dan partikel abrasif dikenal sebagai *abrasive water-jet cutting* dan *abrasive slurry-jet cutting*. Perbedaan antara kedua metode tersebut adalah pada proses pencampuran fluida dengan partikel abrasif. Pada *abrasive water-jet cutting*, fluida disemprotkan melalui nosel dan partikel abrasif akan terbawa oleh aliran fluida yang berkecepatan tinggi dan kemudian bercampur di tabung pencampur. Sedangkan pada *abrasive slurry-jet cutting*, campuran antara fluida dan partikel abrasif dibuat terlebih dahulu sebelum disemprotkan melalui nosel. Dalam penelitian dan pengembangan ini, akan dilakukan suatu rancangan dan pembuatan serta pengujian alat *abrasive water-jet*.

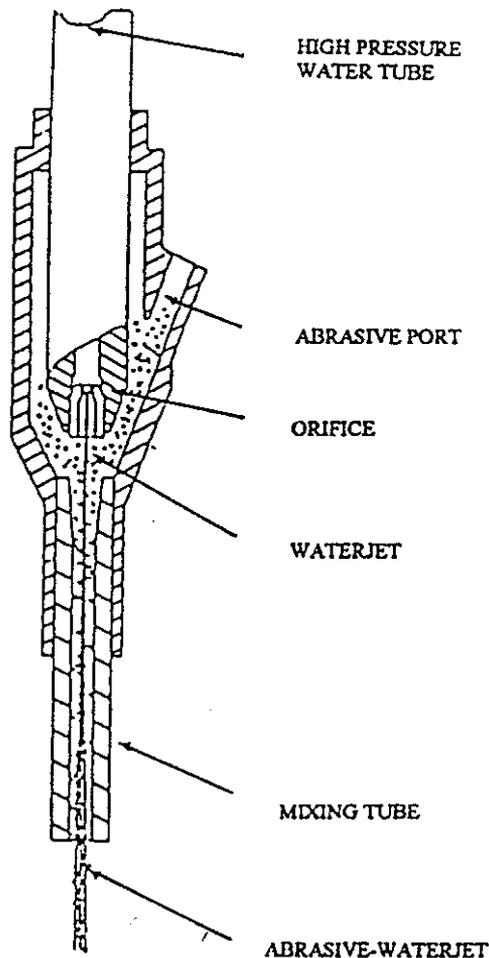
2. PRINSIP KERJA ABRASIVE WATERJET

Abrasive-Waterjet (AWJ) yang dipakai untuk memotong logam berupa pancaran air yang bercampur dengan partikel abrasif. Fungsi air adalah untuk memungkin partikel abrasif dipercepat sehingga mencapai kecepatan 300-600 m/s dengan laju aliran abrasif antara 5-16 g/s. Air ditekan hingga mencapai 400 MPa dan dialirkan ke dalam *sapphire orifice* sehingga menghasilkan pancaran yang koheren dan waterjet kecepatan tinggi [Hashish, 1989]. Antara *sapphire* atau *waterjet orifice* dengan lubang masuk ke dalam pipa pencampur (*mixing tube*), pancaran air bercampur dengan partikel abrasif yang masuk dari *abrasive port* dan di dalam *mixing tube* kedua komponen tersebut bercampur dan keluar dari nosel berupa campuran air dan abrasif yang berkecepatan tinggi.

Gambar 1 menunjukkan konsep dari sistem *abrasive-waterjet (AWJ)*, dimana efek venturi dipakai untuk menggambarkan partikel abrasif masuk ke dalam saluran pencampur. Pada saluran pencampur, terutama pada bagian ujung lubang waterjet (*waterjet orifice*), momentum ditransfer ke partikel abrasif yang dipercepat secara tiba-tiba dan didorong ke dalam *mixing tube*. Pada *mixing tube* dilakukan pencampuran lebih lanjut antara air dan partikel abrasif, sehingga menghasilkan jet yang koheren.

Laju aliran air ditentukan oleh besarnya tekanan yang diberikan, serta dimensi diameter lubang *waterjet*. Makin besar tekanan yang diberikan dan makin besar diameter lubang *waterjet* akan menghasilkan laju aliran air yang lebih besar pula.

Laju aliran massa partikel abrasif jauh lebih kecil dibandingkan dengan laju aliran air. Disamping karena faktor ekonomis, apabila laju aliran abrasif terlalu besar akan mengurangi kecepatan pancaran jet yang dihasilkan, karena momentum yang dimiliki air akan menjadi berkurang apabila massa partikel yang harus didorong terlalu besar. Sehingga diusahakan laju massa partikel abrasif yang akan dicampur tidak terlalu besar tapi cukup untuk menghasilkan efek erosi yang cukup besar, dengan demikian pemotongan menjadi lebih efektif. Laju massa abrasif berkisar antara 4-20 g/s.



Gambar 1. Skema konsep alat Abrasive-Waterjet [Hashish, 1989]

Parameter-parameter yang berhubungan dengan kemampuan kerja AWJ antara lain adalah :

1. Parameter hidrolis
 - tekanan air
 - laju aliran air
2. Parameter partikel abrasif
 - ukuran partikel abrasif
 - material abrasif
 - kondisi abrasif
 - laju aliran abrasif
3. Parameter pencampuran
 - diameter tabung pencampur
 - panjang tabung pencampur

Tiap parameter tersebut mempunyai peranan yang sangat menentukan dalam pengoperasian AWJ.

3. PERANCANGAN ALAT ABRASIVE WATERJET

Salah satu parameter penting yang menentukan kemampuan potong alat Abrasive-Waterjet (AWJ) adalah laju aliran abrasif. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, fungsi dari partikel abrasif adalah untuk memungkinkan terjadinya pelepasan material target atau material yang akan dipotong akibat adanya proses erosi dari partikel abrasif yang ditembakkan ke material target.

Besar laju aliran partikel abrasif sangat mempengaruhi kemampuan kedalaman potong AWJ. Semakin besar jumlah aliran partikel abrasif, makin dalam pula pemotongan yang dapat dilakukan. Hal ini dapat dilihat dari persamaan (1) [Hashish, 1989]

$$h = c \sqrt{\frac{M_a V_{awj}^2}{8\sigma U} + \frac{2M_a(1-c)V_{awj}^2}{\pi U_s d_j}} \quad (1)$$

Pada saat proses pencampuran, partikel abrasif mengalir dari *abrasive storage* ke dalam *mixing tube*. Karena proses pengaliran abrasif diakibatkan oleh efek hisap yang ditimbulkan oleh pengaruh tekanan air, maka aliran abrasif ini tentunya mempunyai kemampuan suplai aliran maksimum, kondisi suplai maksimum ini terjadi jika katup pengatur aliran abrasif terbuka penuh, sehingga partikel abrasif dapat mengalir seluruhnya ke lubang *mixing tube*.

Penentuan jumlah aliran partikel abrasif didasarkan pada hukum kontinuitas dan hukum kekekalan momentum antara air dan partikel abrasif.

Dari persamaan kekekalan momentum air dan abrasif di dalam nosel :

$$M_w V_w = (M_a + M_w) V_{awj} \quad (2)$$

Persamaan kontinuitas aliran :

$$Q_a + Q_w = Q_{awj} \quad (3)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis menjadi :

$$M_a / \rho_a + M_w / \rho_w = V_{awj} A_m \quad (4)$$

Dari persamaan (3) dan (4) diperoleh :

$$V_{awj} = \frac{V_w M_w}{(M_a + M_w)} \quad (5)$$

$$V_{awj} = \frac{(M_a / \rho_a) + (M_w / \rho_w)}{A_m} \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) menyatakan kecepatan yang dihasilkan oleh nosel AWJ yang dipergunakan untuk memotong. Dari kedua persamaan tersebut dapat diturunkan untuk mendapatkan harga laju aliran abrasif (M_a).

$$M_a^2 + M_a \left(M_w \rho_a + M_w \rho_w \right) + M_w^2 \rho_a$$

$$- V_w M_w A_m \rho_a \rho_w = 0$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan dengan persamaan kuadrat sehingga harga laju aliran abrasif maksimum dapat diperoleh dengan mencari akar persamaan tersebut.

Kriteria lain yang dapat menggambarkan kemampuan potong suatu alat AWJ adalah kedalaman potong yang dapat dicapai oleh alat tersebut. Makin dalam kemampuan potong maka makin baik pula alat AWJ tersebut demikian pula sebaliknya.

Faktor-faktor yang menentukan kedalaman potong antara lain telah dijelaskan sebelumnya. Akan tetapi sifat dan jenis material yang akan dipotong juga menentukan kedalaman potong yang akan dihasilkan. Sifat material yang berkaitan langsung dengan kemampuan potong AWJ adalah tegangan alir atau *flow stress* (σ) dan energi spesifik (ϵ). Tegangan alir material erat hubungannya dengan kekerasan (*hardness*) material (*toughness*). Harga dari tegangan alir dan energi spesifik beberapa material dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Tegangan alir dan energi spesifik material aluminium, titanium dan inconel (Hashish, 1989)

Material	σ (MPa)	ϵ (MPa)
Aluminium	276	6900
Titanium	883	11385
Inconel	1035	21045

Secara matematis pernyataan yang menyatakan kedalaman potong telah dinyatakan pada persamaan (1). Kedalaman potong hasil perhitungan tersebut adalah kedalaman potong pada kondisi jarak *standoff* atau jarak antara ujung nosel dengan material target antara 5-10 mm. Jika jarak *standoff* bertambah maka kedalaman potong yang dihasilkan juga akan berkurang.

$$h = c \sqrt{\frac{M_a V_{awj}^2}{8\sigma U} + \frac{2M_a (1-c) V_{awj}^2}{\pi U \epsilon d_j}}$$

Persamaan di atas berlaku atau dapat dipakai jika kecepatan pelintasan (*traverse*) yang diberikan (U) lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan kritis (U_c). Jika kecepatan *traverse* lebih besar, maka kedalaman potong hanya dipengaruhi oleh mode *deformation wear* saja. Persamaan kedalaman potong menjadi

$$h = \frac{2M_a V_{awj}^2}{\pi U \epsilon d_j}$$

Harga konstanta c dihitung dari perbandingan kecepatan *traverse* (U) dengan kecepatan kritis (U_c). Dengan asumsi bahwa harga c berbanding lurus dengan perbandingan U/U_c , maka harga c dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$c = 1 - \frac{U}{U_c}$$

$$\text{sedangkan harga } U_c = \frac{M_a V_{awj}^2}{20\sigma d_j}$$

Dengan memasukkan parameter-parameter tekanan air (P), diameter *waterjet* (d_n), diameter nosel (d_m), jenis material target (σ , ϵ), laju partikel abrasif (M_a), kecepatan *traverse* (U), sedangkan diameter jet (d_j) diasumsikan sama dengan diameter nosel, maka kedalaman potong yang dihasilkan oleh AWJ dapat dihitung.

Komponen yang paling sering diganti pada perangkat alat AWJ adalah nosel (*mixing tube*), karena nosel juga mengalami erosi akibat partikel abrasif yang dipancarkan. Untuk pemotongan atau proses pemesinan yang membutuhkan ketelitian nosel harus diganti jika diameter berubah menjadi dua kali diameter awal. Dengan batasan ketentuan tersebut maka umur pemakaian nosel dapat diketahui.

Jika dipakai ketentuan bahwa nosel harus diganti jika diameter berubah besarnya menjadi dua kali diameter awal, maka volume yang aus adalah

$$V_{\text{aus}} = \pi \frac{[(2d_m)^2 - d_m^2]}{4} (I_m) \quad (7)$$

dimana I_m adalah panjang nosel = 50-70 d_m (Hashish, 1991).

Untuk pemotongan yang tidak memerlukan ketelitian yang tinggi syarat penggantian nosel akan lebih longgar sehingga umur nosel akan lebih panjang.

4. PEMBUATAN ALAT ABRASIVE WATERJET

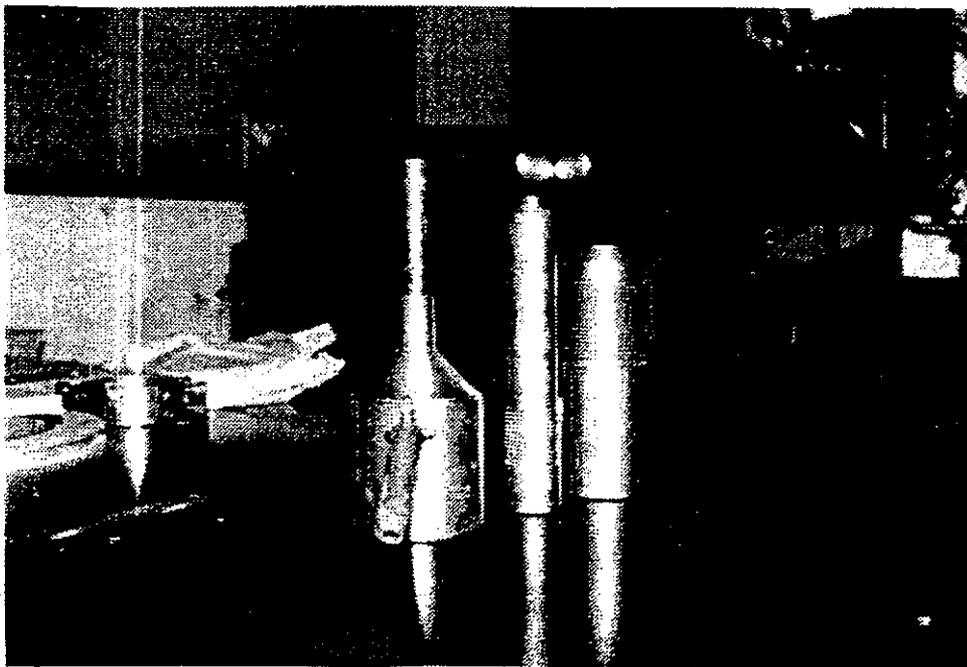
Pembuatan alat dilakukan di laboratorium Teknik Produksi Jurusan Teknik Mesin ITB dengan mengkombinasikan antara pembuatan komponen dan pemanfaatan komponen dan alat yang tersedia secara komersial. Tujuannya adalah untuk menekan biaya produksi sehingga nantinya alat ini dapat diproduksi secara ekonomis di Indonesia. Komponen utama yang dibuat di laboratorium adalah nosel yang terdiri atas *high pressure water tube*, *jacket*, *abrasive port* dan *mixing tube*. Data teknis komponen nosel dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Data teknis utama komponen nosel

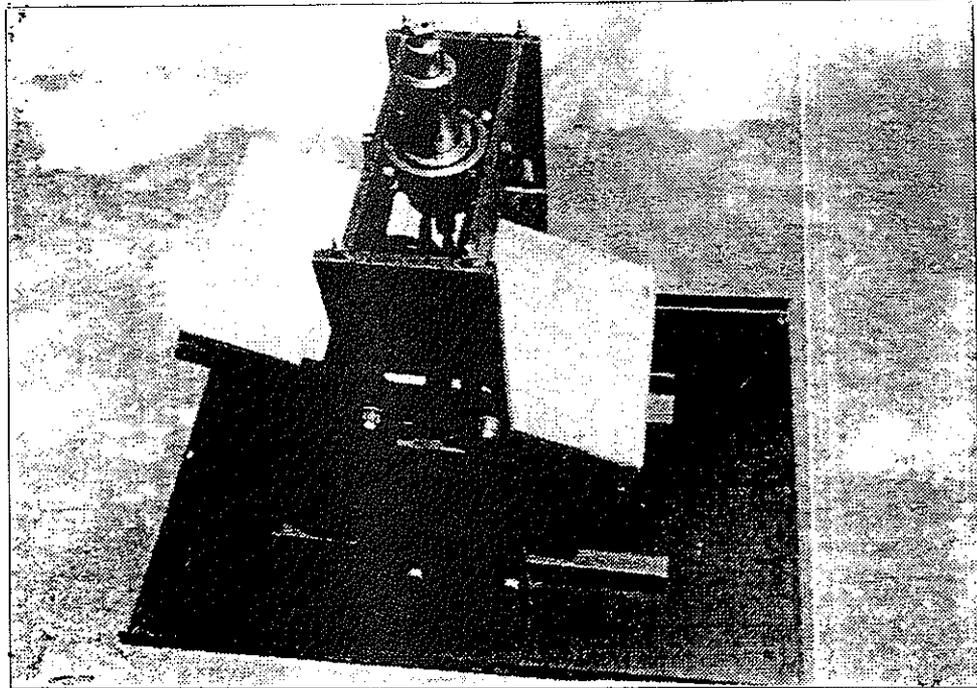
Komponen	bahan	Keterangan
High Pressure Tube	ST-60	Diameter luar = 5 mm. Diameter dalam = 0,5 mm
Jacket (2 buah)	ST-60	Untuk memegang high pressure tube
Abrasive port	ST-60	Kemiringan 45°
Mixing tube	Tungsten Carbide	Diameter dalam = 2 mm

Proses pembuatan terdiri atas pemesinan dan pengelasan.

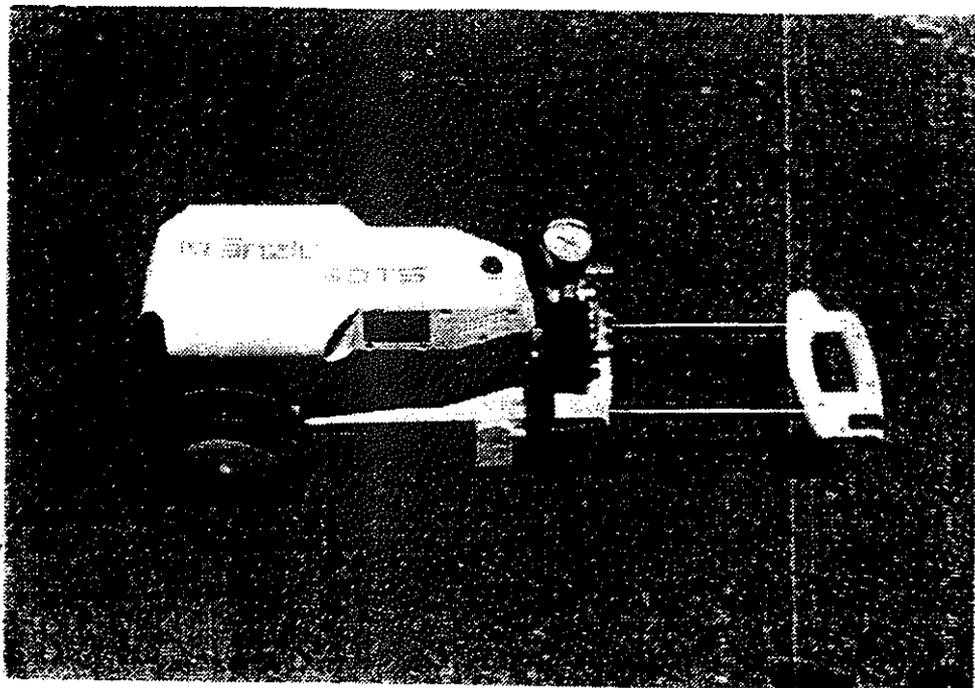
Untuk mendapatkan tekanan fluida yang tinggi, maka diperlukan suatu pompa yang mampu menghasilkan tekanan minimum sebesar 180 bar dan untuk itu digunakan pompa torak KRANZLE tipe 180 TS. Pompa tersebut dapat diperoleh secara komersial dengan harga yang bersaing. Komponen lainnya yang berupa komponen penunjang seperti halnya ring pemegang nosel, meja kerja, rumah nosel dan kaca pelindung dapat dengan mudah dibuat di laboratorium. Berikut ini ditunjukkan gambar komponen nosel pemegang nosel dan pompa.



Gambar 2. Komponen Nosel yang terdiri atas abrasive port, high pressure tube, jacket dan mixing tube



Gambar 3. Pemegang Nosel yang terdiri atas meja pemegang benda kerja dan pengatur kemiringan meja



Gambar 4. Pompa Torak

5. PENGUJIAN ALAT

Pengujian alat dilakukan untuk melihat kemampuannya dalam memotong logam serta untuk mengetahui pengaruh dari parameter pengujian terhadap hasil pemotongan. Pada pengujian ini digunakan partikel abrasif Silicon Carbide Mesh 120.

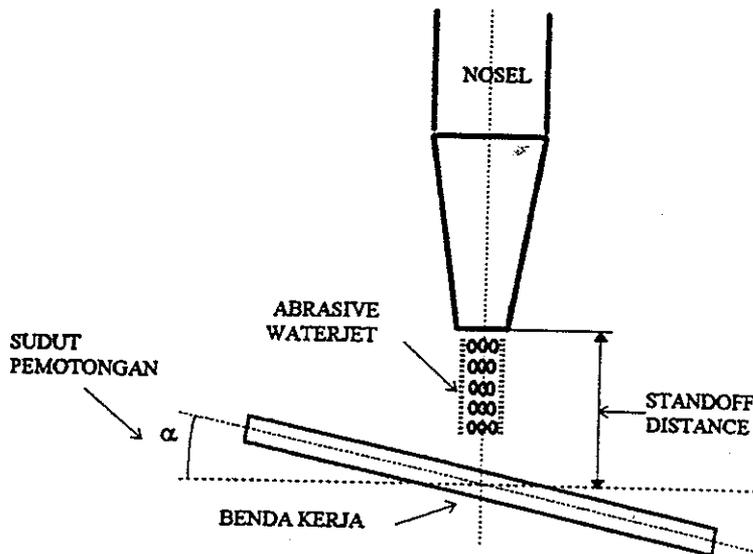
Pengujian pertama dilakukan dengan menembakkan pancaran air tanpa partikel abrasif ke permukaan material. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh partikel abrasif pada proses pemotongan logam dengan Abrasive Waterjet Cutter (AWJC). Kemudian dilakukan pengujian kemampuan potong AWJC terhadap tiga pelat aluminium dengan ketebalan yang berbeda, yaitu 2 mm, 4 mm dan 6 mm.

Pengaturan kecepatan pelintasan tidak dapat dilakukan karena keterbatasan peralatan pada sistem AWJC ini, sehingga pengujian dilakukan bukan dengan memotong

logam tetapi dengan melubangi permukaan target. Parameter yang dapat diatur untuk pengujian pada sistem AWJC ini adalah jarak *standoff*, dan sudut pemotongan. Sedangkan parameter lainnya yang perlu diamati adalah waktu pemotongan, harga tekanan pompa, perubahan dimensi mixing tube, serta bentuk lubang permukaan target hasil pengujian.

Pemilihan sudut pemotongan ditentukan berdasarkan fenomena yang terjadi pada keausan erosi dimana keausan maksimum terjadi pada sudut pemotongan sebesar 13°

Pengaturan laju aliran massa partikel abrasif tidak dapat dilakukan, tetapi dapat ditentukan harga rata-ratanya dengan membandingkan jumlah massa partikel abrasif yang telah terpakai dengan waktu yang dibutuhkan selama pengujian.



Gambar 5. Pengujian alat Abrasive-Waterjet Cutter

Data yang diperoleh dari hasil pengujian alat AWJC adalah :

- Pengujian tanpa partikel abrasif ($\alpha = 0^\circ$)

Tebal Plat (mm)	Waktu Pemotongan (menit)	
	Standoff distance 2 mm	Standoff distance 6 mm
2	5 (tidak berlubang)	10 (tidak berlubang)
6	tidak dilakukan	15 (tidak berlubang)

- Pengujian dengan partikel abrasif

Standoff Distance 2 mm

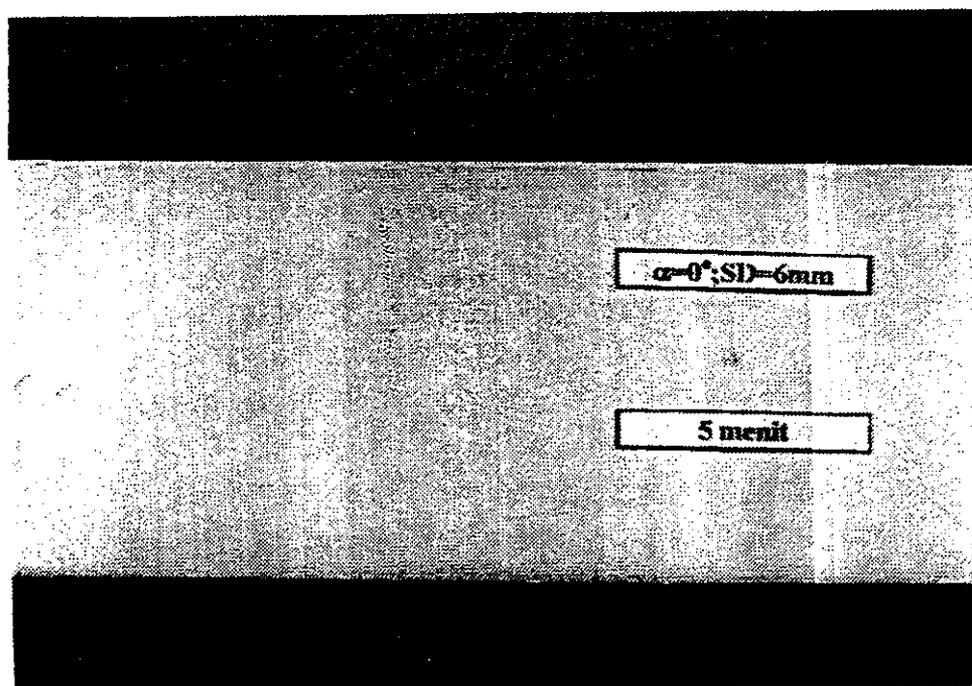
Tebal Plat (mm)	Waktu Pemotongan (detik)	
	Meja Datar ($\alpha = 0^\circ$)	Meja Miring ($\alpha = 13^\circ$)
2	31	32
4	95	82
6	194	171

Standoff Distance 6 mm

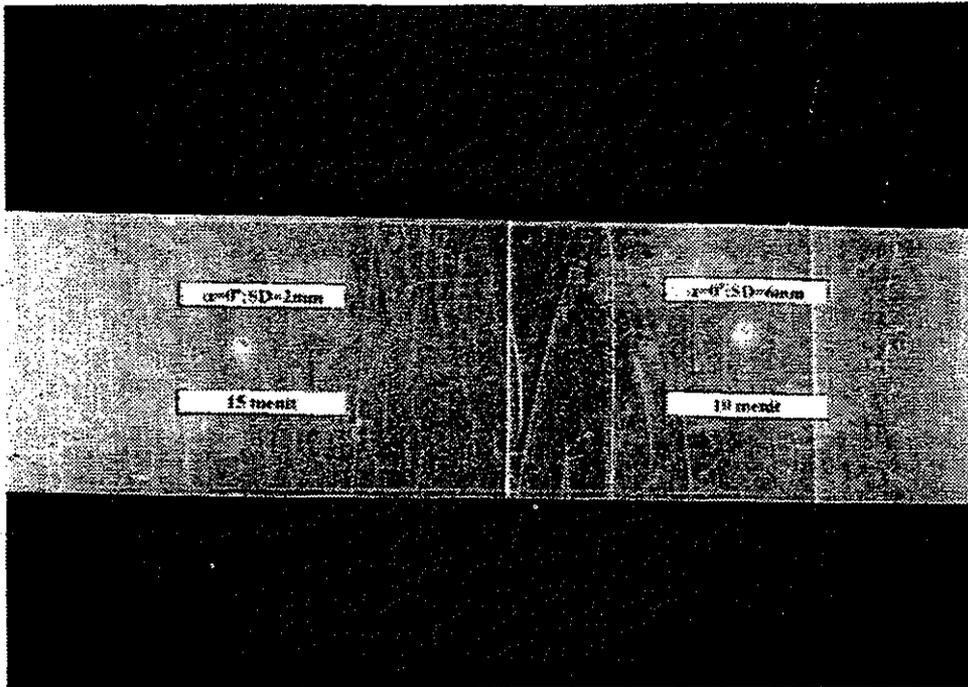
Tebal Plat (mm)	Waktu Pemotongan (detik)	
	Meja Datar ($\alpha = 0^\circ$)	Meja Miring ($\alpha = 13^\circ$)
2	35	34
4	158	113
6	238	182

Tekanan pompa $P = 205$ bar
 Massa partikel abrasif yang terpakai $M_{tot} = 2724$ gr
 Waktu pengujian $t_p = 1365$ detik
 Diameter atas mixing (visual) $d_u = 4$ mm
 Diameter bawah mixing (visual) $d_d = 2,5$ mm

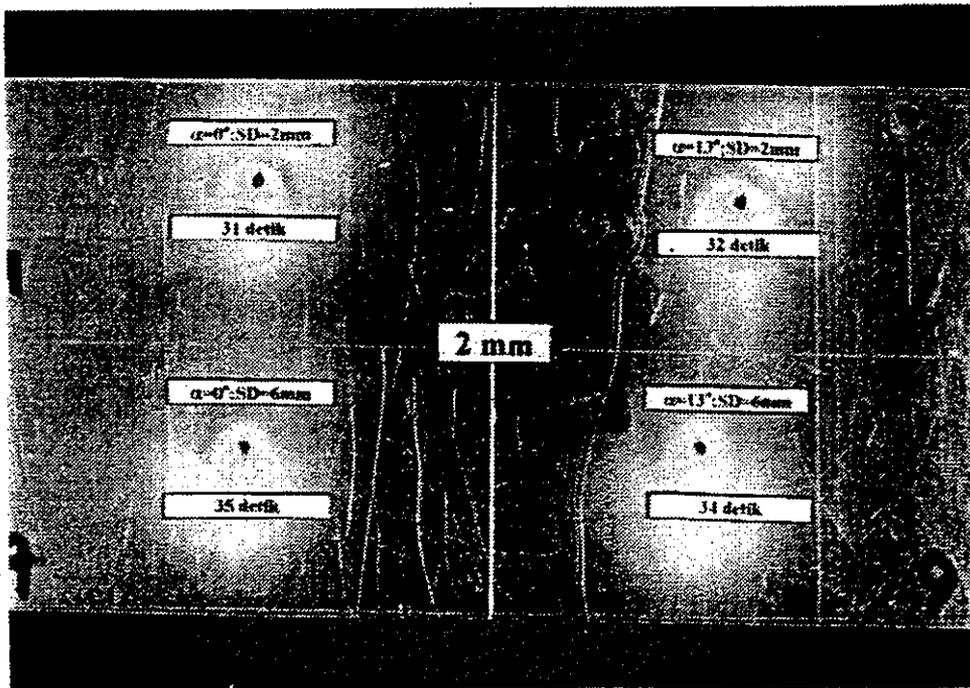
Dalam percobaan menembakkan pancaran air ke material target tanpa menggunakan partikel abrasif, hanya menghasilkan sedikit keausan pada permukaan. Hasil tersebut diperoleh dalam waktu yang cukup lama. Hasil-hasil percobaan secara visual dapat dilihat pada gambar berikut ini. Gambar tersebut menunjukkan lubang hasil pemotongan dengan AWJC untuk berbagai kondisi pengujian.



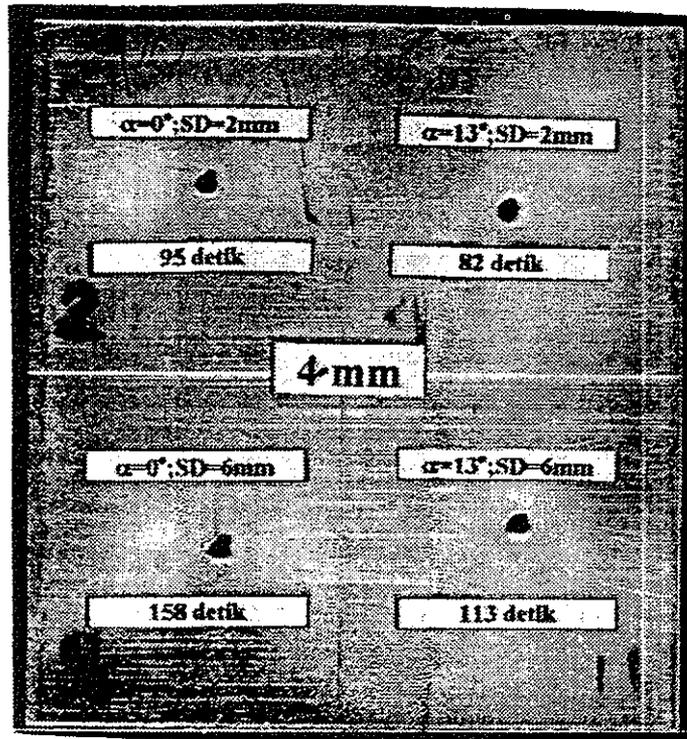
Gambar 6. Pengujian tanpa partikel pada pelat aluminium 6 mm



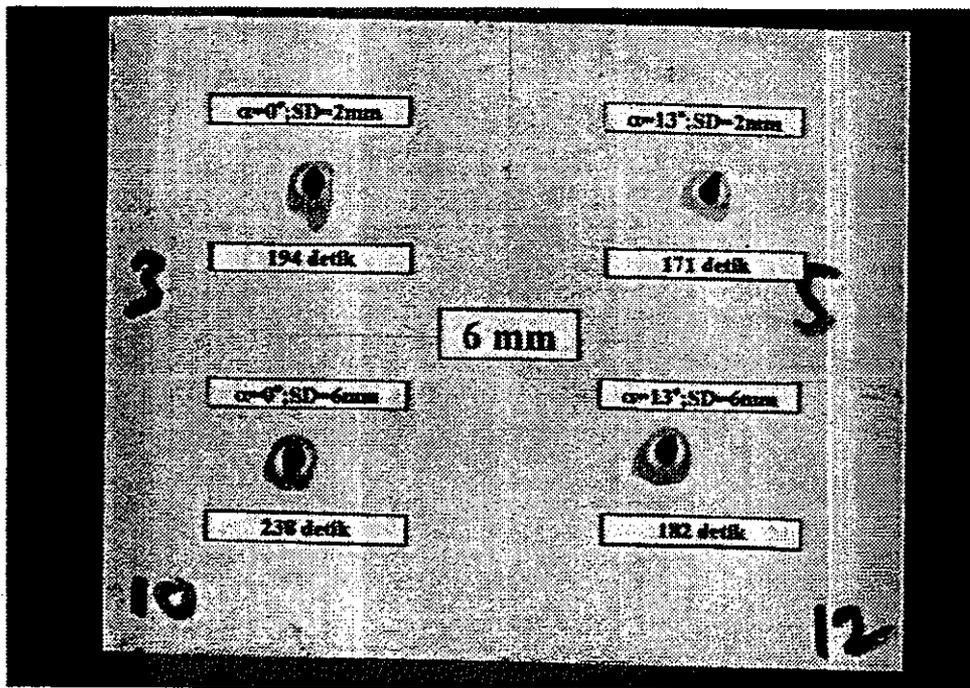
Gambar 7. Pengujian tanpa partikel pada pelat aluminium 2 mm.



Gambar 8. Pengujian AWJC pada pelat aluminium 2 mm



Gambar 9. Pengujian AWJC pada pelat aluminium 4 mm

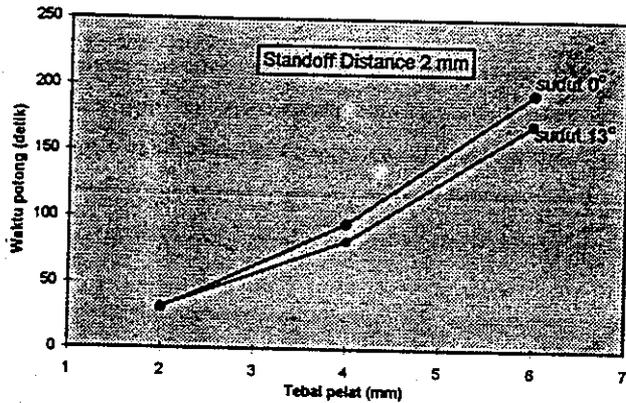


Gambar 10. Pengujian AWJC pada pelat aluminium 6 mm

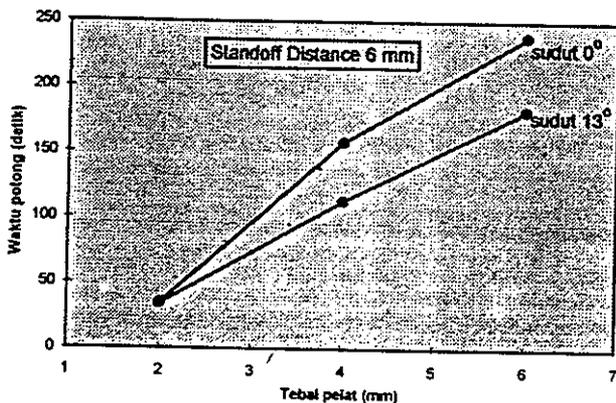
6. ANALISIS HASIL PENGUJIAN

Grafik pengaruh sudut pemotongan terhadap waktu pemotongan dapat dilihat pada gambar 11 untuk jarak *standoff* 2 mm dan gambar 12 untuk jarak *standoff* 6 mm. Dari percobaan diperoleh bahwa waktu yang diperlukan untuk memotong logam pada sudut pemotongan 13° lebih cepat dibandingkan dengan sudut pemotongan 0° (tegak lurus permukaan material target).

Percobaan tersebut membuktikan bahwa pada pemotongan logam dengan sudut 13° terjadi keausan yang lebih besar dibandingkan pemotongan pada sudut 0°. Untuk membuktikan sudut pemotongan maksimum terjadi pada sudut 13° perlu dilakukan pengujian pada sudut pemotongan yang lebih besar dari sudut tersebut.



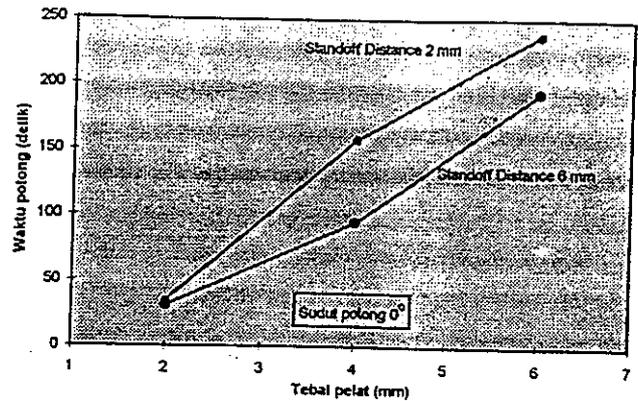
Gambar 11. Pengaruh sudut potong terhadap waktu potong untuk jarak *standoff* 2 mm



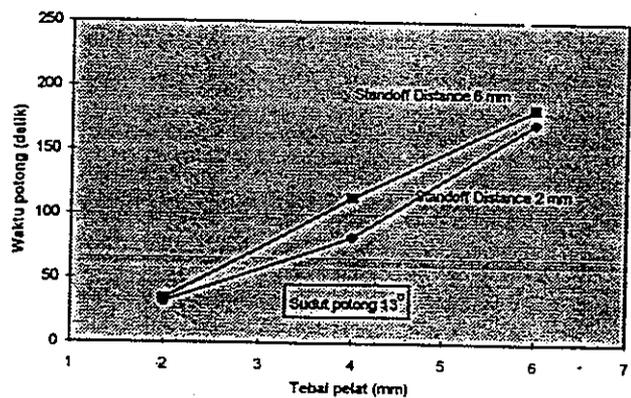
Gambar 12. Pengaruh sudut potong terhadap waktu potong untuk jarak *standoff* 6 mm

Grafik pengaruh jarak *standoff* terhadap waktu pemotongan dapat dilihat pada gambar 13 untuk sudut pemotongan $\alpha = 0^\circ$ dan gambar 14 untuk sudut pemotongan $\alpha = 13^\circ$. Dari percobaan diperoleh bahwa waktu yang diperlukan untuk memotong logam dengan jarak *standoff* 2 mm lebih cepat dibandingkan dengan jarak *standoff* 6 mm.

Pancaran *waterjet* yang keluar dari nosel akan semakin menyebar seiring dengan menjauhnya *waterjet* tersebut. Jika jarak *standoff* diperbesar, yang berarti memperlebar jarak antara nosel dengan permukaan kontak, maka luas bidang kontak akan menjadi lebih besar. Akibatnya gaya tekan *waterjet* akan terbagi pada bidang yang lebih luas. Selain itu, volume yang harus dipotong juga lebih besar, sehingga akan mengurangi kemampuan potong AWJC. Fenomena tersebut ditunjukkan pada gambar 15.

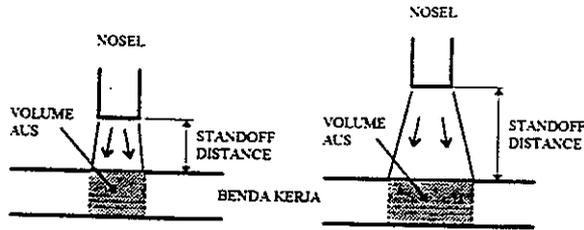


Gambar 13. Pengaruh jarak *standoff* terhadap volume aus untuk sudut potong 0°



Gambar 14. Pengaruh jarak *standoff* terhadap volume aus untuk sudut potong 13°

Berdasarkan analisis di atas dapat disimpulkan bahwa penambahan jarak *standoff* akan mengurangi kemampuan potong AWJC, serta memperbesar lubang atau celah hasil pemotongan. Dengan kata lain, waktu yang dibutuhkan untuk memotong akan lebih lama.



Gambar 15. Pengaruh jarak standoff terhadap volume aus

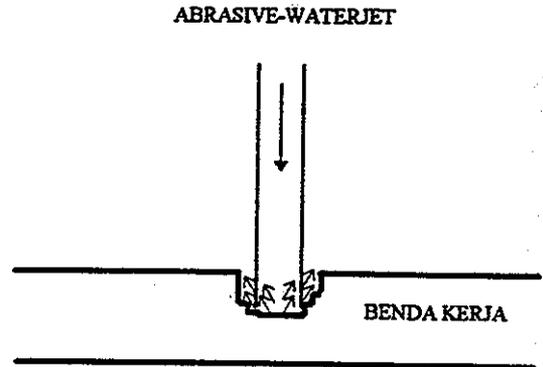
Dalam percobaan menembakkan pancaran air ke material target tanpa menggunakan partikel abrasif, hanya menghasilkan sedikit keausan pada permukaan. Hasil tersebut diperoleh dalam waktu yang cukup lama. Sebagai contoh material aluminium setebal 2 mm dikenakan hantaman *waterjet* selama 15 menit, dengan jarak standoff 2 mm dan arah potong tegak lurus permukaan kontak. Secara visual diperkirakan kedalaman aus yang terjadi tidak melebihi 1 mm. Bandingkan pada percobaan dengan menggunakan abrasive-waterjet, waktu yang dibutuhkan memotong hanya 31 detik.

Berdasarkan hasil percobaan tersebut dapat disimpulkan bahwa material abrasif sangat berpengaruh pada proses pemotongan dengan AWJC. Fungsi air adalah sebagai media pembawa partikel untuk mencapai kecepatan tinggi.

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian alat AWJC, dapat disimpulkan bahwa semakin tebal material target, maka waktu yang dibutuhkan untuk memotong akan lebih lama. Hal ini umum terjadi pada seluruh proses pemesinan yang ada. Selain itu, secara visual hasil pemotongan pada pelat tebal memiliki dimensi lubang atau celah yang lebih besar dibandingkan dengan pelat tipis.

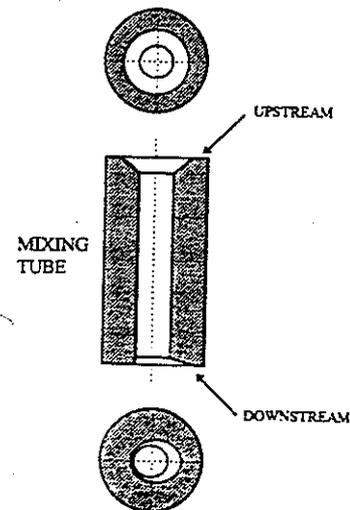
Fenomena tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut; pada awal proses pemotongan, partikel abrasif yang berkontak dengan permukaan material akan berhenti (tertanam) pada material target atau terpantul menyebar ke sekeliling. Partikel abrasif yang terpantul ini dapat menyebabkan keausan lanjut pada dinding lubang hasil pemotongan. Waktu yang dibutuhkan untuk memotong pelat tipis tidak terlalu lama, sehingga keausan lanjut

yang terjadi tidak besar. Sedangkan untuk pelat tebal, waktu pemotongan relatif lama. Akibatnya keausan lanjut yang terjadi juga lebih besar. Hal inilah yang menyebabkan lubang hasil pemotongan pada pelat tebal lebih besar dibandingkan pada pelat tipis. Gambar 16 menjelaskan fenomena tersebut.



Gambar 16. Keausan lanjut pada material target

Dari hasil pengamatan secara visual pada komponen *mixing tube* setelah proses pemotongan, terlihat pelebaran diameter pada bagian atas (*upstream*) dan ujung bawah (*down stream*) *mixing tube*. Pada bagian atas, pelebaran yang terjadi bervariasi hingga mencapai 4 mm, sedangkan bagian bawah mencapai diameter 3 mm. Bagian atas *mixing tube* merupakan daerah awal pencampuran partikel abrasif dengan *waterjet*, dimana partikel abrasif masuk pada sudut impact yang relatif besar sehingga terjadi erosi. Sedangkan pada ujung bawah *mixing tube*, partikel abrasif mengalir dengan sudut impact yang relatif kecil sehingga abrasi lebih dominan. Erosi lebih besar efek keausannya dibandingkan dengan abrasi. Akibat keausan yang terjadi pada bagian atas akan lebih besar dibanding ujung bawah *mixing tube*.



Gambar 17. Keausan pada mixing tube

Selain pelebaran diameter, pada ujung bawah *mixing tube* juga terjadi keausan kesamping. Hal ini akibat proses pemesian (bor) yang kurang sempurna sewaktu membuat lubang *mixing tube*. Karena panjang mata bor berdiameter 2 mm adalah 100 mm, maka pengeboran dengan satu arah tidak dapat dilakukan sehingga pengeboran dilakukan dari dua sisi. Akibatnya terjadi ketidaklurusan pada lubang *mixing tube*, sehingga arah *abrasive-waterjet* yang menyamping tersebut menyebabkan keausan lokal pada salah satu sisi permukaan *mixing tube*. Efek ketidaklurusan tersebut menghasilkan lubang hasil pemotongan berbentuk elips.

Salah satu parameter untuk menentukan kemampuan kerja AWJC adalah kedalaman potong yang dapat dihasilkan. Beberapa sifat dari material target yang akan dipotong juga menentukan kedalaman potong yang dihasilkan. Sifat material target yang berpengaruh besar terhadap kemampuan potong AWJC adalah tegangan alir (σ) dan energi spesifik (ϵ).

Dengan menggunakan persamaan (1) maka kedalaman potong material target dapat diperhitungkan sebagai berikut :

Tabel 3. Kedalaman potong material target

Material	Vw (m/s)	Mw = Mn (gr/s)	Vawj (m/s)	Uc (m/s)	c	h (mm)
Alumunium	202,6	0,0397	101,3	0,003	0,67	5
Titanium	202,6	0,0397	101,3	0,0001	0	2
Inconel	202,6	0,0397	101,3	0,0009	0	1

Perhitungan tersebut dilakukan berdasarkan data teknis alat yang digunakan dalam pengujian ini.

7. PENUTUP

Berdasarkan pembahasan terdahulu dapat disimpulkan bahwa alat potong non-konvensional ini dapat diproduksi secara lokal dengan biaya relatif murah. Kemampuan alat tersebut terbukti cukup baik dan menjanjikan suatu peluang untuk menghasilkan produk yang berkualitas. Modifikasi dan penyempurnaan masih diperlukan untuk meningkatkan kemampuan alat ini. Hal ini dapat dilakukan karena teknologinya telah dikuasai dengan baik.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini dimungkinkan oleh adanya dana penelitian Hibah Bersaing dengan Kontrak No. 009/P4M/DPPM/PHBIV/1/1995 tanggal 1 Juni 1995 dan No. 07/P2SPT/DPPM/96PHB/2/V/1996 tanggal 6 Mei 1996 yang diberikan oleh Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat, Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Peneliti juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada rekan Dr.Ir. Priyono Sutikno dan Dr.Ir. Yatna Yuwana atas partisipasi dalam diskusi dan dukungan informasi.

9. DAFTAR PUSTAKA

1. Hashish, Mohamed, 1989, "An Investigation of Milling With Abrasive-Waterjet", Journal of Engineering for Industry, Vol. III, May 1989, ASME, pp. 158-166.
2. Hashish, M., 1991, "Optimatization Factors in Abrasive-Waterjet Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol.113, February 1991, ASME, pp. 29-37.

❖SSB/mn.jet.doc❖