



---

---

## **Analisa Pengaruh Variasi Mandrel Terhadap Toleransi Pipa Pada Rotary Draw Bending**

**Andik Wiryo Susanto<sup>1</sup>, Gatot Soebiyakto<sup>2</sup>✉, Akhmad Farid<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama  
Jl. Taman Borobudur Indah No.1, Malang, Indonesia  
✉ *Corresponding author:* purbo@widyagama.ac.id

Diterima Redaksi : 23 Juli 2023  
Selesai Revisi : 4 Oktober 2023  
Diterbitkan Online : 20 November 2023

### **Abstract**

*Rotary Draw Bending is the most commonly used bending technique in tube bending to achieve good precision results. There are several other bending techniques such as Ram Method, Rotary Method, Roller Method, and Compression Method. In this analysis, an experimental method was carried out by making variations of mandrel models and different mandrel dimensions with a bending angle of 90 degrees. For the measurement process, a digital caliper is used and then the measurement results are drawn with the Mastercam software application. In each rotary draw bending process, the results of SUS 304 stainless steel pipe bending are observed whether they experience wrinkling or smoothness in the bending section. In this experiment, good bending was produced at mandrel diameters tolerating 0.2mm, 0.3mm, and 0.4mm to the inner diameter of the pipe. However, although the results are good at the size of the mandrel with a tolerance of 0.2mm, it should be noted that the process of inserting and removing the stainless steel pipe will have difficulty because it must apply more pressure, sometimes having to hit with a hammer.*

**Keywords:** rotary tensile bending; end mill cutter; stainless steel; SUS 304.

### **Abstrak**

Rotary Draw Bending adalah teknik bending yang paling umum digunakan dalam tube bending untuk mencapai hasil kepresisian yang baik. Ada beberapa teknik bending lainnya seperti Metode Ram, Metode Rotary, Metode Rol, dan Metode Compression. Dalam analisis ini, dilakukan metode eksperimen dengan membuat variasi model mandrel dan dimensi mandrel yang berbeda dengan sudut bending 90 derajat. Untuk proses pengukuran, digunakan jangka sorong digital yang kemudian hasil pengukurannya digambarkan dengan aplikasi software Mastercam. Pada setiap proses rotary draw bending, diamati hasil bending pipa stainless steel SUS 304 apakah mengalami kerutan (wrinkling) atau halus pada bagian tekukan. Pada percobaan ini, dihasilkan bending yang bagus pada diameter mandrel bertoleransi 0.2mm, 0.3mm, dan 0.4mm terhadap diameter dalam pipa. Namun, meskipun hasilnya bagus pada ukuran mandrel yang toleransinya 0.2 mm, harus diberikan catatan karena untuk proses memasukkan dan mengeluarkan pipa stainless steel akan mengalami kesulitan karena harus melakukan tekanan yang lebih, terkadang harus melakukan pukulan dengan palu.

**Kata kunci:** rotary draw bending; end mill cutter; stainless steel; SUS 304.

### **1. Pendahuluan**

Bending adalah suatu proses yang melibatkan pemberian tekanan pada bagian tertentu sehingga terjadi deformasi plastis pada bagian yang diberi tekanan. Sedangkan proses bending

adalah proses penekukan atau pembengkokan menggunakan alat bending manual dan mesin bending otomatis [1]. Secara mekanika, proses bending terdiri dari dua gaya, yaitu tarik dan tekan [2]. Saat melakukan proses bending pipa rata-rata memberikan atau memasukan isi seperti alumunium tepat pada sisi bengkokan. Hal tersebut di lakukan supaya tidak terjadi kerusakan pada hasil bending karena deformasi yang tidak sesuai dengan harapan, misalnya pipa menjadi elips yang berlebih dan pipa menjadi berkerut pada bagian tekukan. Salah satu caranya adalah dengan Rotary Draw Bending [3]. Pada system rotary draw bending, mandrel sangat berpengaruh sebagai support yang di letakan di dalam pipa untuk mencegah kerusakan pada pipa dan setelah derajat tekuk dalam proses bending selesai, pipa dapat di lepas dari mandrel dengan cara di tarik secara manual. Beberapa penelitian menggunakan rotary draw bending telah dilakukan.

Menurut Sayuti, dalam proses rotary draw bending, mandrel ditempatkan di dalam tabung, dan tikungan mati, penjepit mati, tekanan mati, dan wiper mati mengelilingi tabung [4]. Tekukannya dilakukan di sekitar tikungan mati. Mandrels konvensional adalah jenis tautan bola yang pembuatannya membutuhkan presisi tinggi dan biaya. Tautan dari mandrel tautan bola terpapar pada kegagalan daerah leher karena bentuk tertentu dari tautan. Jenis mandrel baru yang disebut “rantai tautan mandrel” disajikan, diproduksi, dan diuji. Perbedaan utama dari mandrel ini dengan mandrel konvensional terletak pada derajat kebebasan segmen bola mandrel.

Syadidan melakukan penelitian simulasi FEM. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil springback dari kedua metode yang nantinya akan dibandingkan. Penelitian pertama dilakukan dengan mensimulasikan proses laser beam bending hingga mencapai batas maksimum sudut bending yang dapat diterima. Selain itu, simulasi juga dilakukan pada metode rotary draw bending dengan parameter diameter dan ketebalan tube yang sama seperti sebelumnya namun, dengan sudut bending yang berbeda yaitu sebesar 60, 120, dan 180 yang akan digunakan sebagai data pendukung nilai springback. Dari simulasi didapatkan bahwa semakin tinggi laser power dan pass number pada laser beam bending, maka akan semakin tinggi springback yang dihasilkan namun, masih sangat kecil bila dibandingkan dengan rotary draw bending [5].

## **2. Metode Penelitian**

Spesifikasi benda uji yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Pipa stainless steel sus 304 diameter 32 mm dengan tebal dinding 1.5 mm sepanjang 12 meter.
2. Pipa stainless steel sus 304 diameter 32 mm dengan tebal dinding 1.5 mm sepanjang 12 meter.

Bahan untuk alat benda uji adalah:

1. Brass diameter 30 mm panjang 1 meter.
2. Stainless steel diameter 25 mm panjang 1 meter.
3. Baut flathead M6 dan mur M6.

## **Prosedur Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jenis dan posisi mandrel terhadap toleransi dimensi pipa stainless steel SUS 304 setelah proses rotary draw bending. Fokus utama penelitian adalah pada perubahan ovalitas, penipisan dinding, dan potensi cacat seperti kerutan atau penyok yang dapat terjadi akibat variasi tersebut.

### 1. Persiapan Benda Uji dan Alat

Benda uji yang digunakan adalah pipa stainless steel SUS 304 dengan diameter luar 32 mm, tebal dinding 1,5 mm, dan panjang 12 meter. Pipa ini dipotong menjadi beberapa bagian dengan panjang yang sesuai untuk proses bending. Untuk pembuatan mandrel, digunakan bahan brass berdiameter 30 mm dan stainless steel berdiameter 25 mm, masing-masing sepanjang 1 meter. Mandrel dirancang dengan berbagai variasi bentuk, seperti ujung rata, ujung chamfer, dan ujung fillet, untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap hasil bending. Baut flathead M6 dan mur M6 digunakan untuk merakit dan memasang mandrel pada peralatan bending.

### 2. Proses Bending

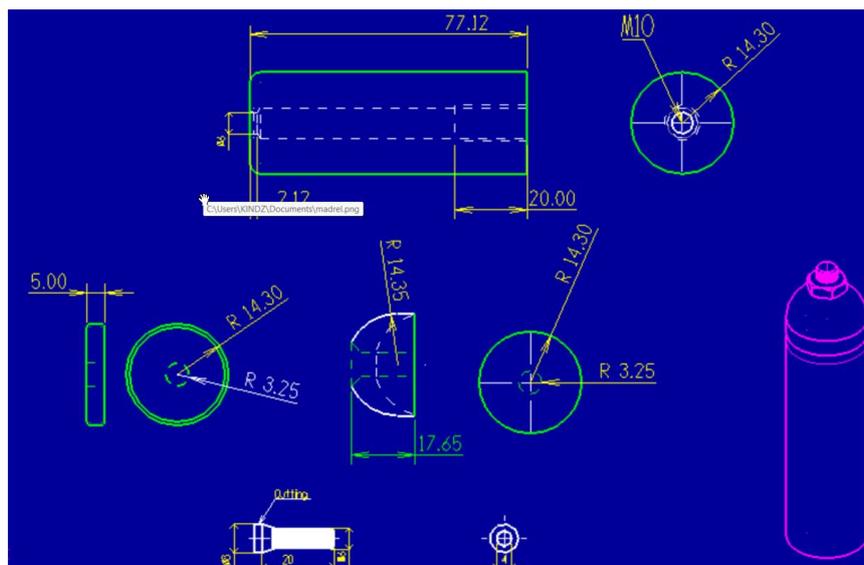
Proses bending dilakukan menggunakan mesin rotary draw bending. Pipa dijepit antara clamp die dan bend die, kemudian bend die diputar untuk membentuk pipa sesuai dengan radius yang diinginkan. Mandrel dimasukkan ke dalam pipa sebelum proses bending untuk memberikan dukungan internal dan mencegah deformasi yang tidak diinginkan. Variasi posisi mandrel, seperti jarak dari pusat bending, juga diuji untuk melihat pengaruhnya terhadap hasil akhir.

### 3. Pengukuran dan Evaluasi

Setelah proses bending, pipa yang telah dibentuk dianalisis untuk mengukur perubahan dimensi dan mendeteksi cacat yang mungkin terjadi. Pengukuran ovalitas dilakukan dengan membandingkan diameter maksimum dan minimum pada bagian lengkung pipa. Penipisan dinding diukur pada sisi luar lengkungan, sementara ketebalan pada sisi dalam juga dicatat untuk mengetahui distribusi ketebalan setelah bending. Cacat seperti kerutan atau penyok diamati secara visual dan didokumentasikan.

### 4. Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengukuran dan observasi dianalisis untuk menentukan pengaruh variasi mandrel terhadap toleransi pipa. Perbandingan antara berbagai jenis dan posisi mandrel dilakukan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang menghasilkan deformasi minimal dan kualitas bending terbaik. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi mengenai penggunaan mandrel yang optimal dalam proses rotary draw bending untuk pipa stainless steel SUS 304.



Gambar 1. Desain Mandrel

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil eksperimen dari variasi model mandrel adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Data hasil eksperimen

Type Mandrel	Dimensi Mandrel	Ukuran Pipa	Smooth (Halus)	Wrinkling (Berkerut)	Toleransi dengan In Tube
Mandrel Tanpa Kepala Fleksibel	Diameter 28.2	Diameter 32 tebal 1.5	√	√	0.8 mm
	Diameter 28.4	Diameter 32 tebal 1.5	√	√	0.6 mm
	Diameter 28.6	Diameter 32 tebal 1.5	√		0.4 mm
	Diameter 28.8	Diameter 32 tebal 1.5	√		0.2 mm
	Diameter 28.2	Diameter 32 tebal 1.5	√		0.8 mm
Mandrel Satu Kepala Fleksibel	Diameter 28.4	Diameter 32 tebal 1.5	√	√	0.6 mm
	Diameter 28.6	Diameter 32 tebal 1.5	√		0.4 mm
	Diameter 28.8	Diameter 32 tebal 1.5	√		0.2 mm
	Diameter 28.2	Diameter 32 tebal 1.5	√	√	0.8 mm
Mandrel Dua Kepala Fleksibel	Diameter 28.4	Diameter 19 tebal 1.2	√	√	0.6 mm
	Diameter 28.6	Diameter 19 tebal 1.2	√		0.4 mm
	Diameter 28.8	Diameter 19 tebal 1.2	√		0.2 mm
Mandrel Tanpa Kepala Fleksibel	Diameter 16	Diameter 19 tebal 1.2	√	√	0.6 mm
Mandrel Satu Kepala Fleksibel	Diameter 16.3	Diameter 19 tebal 1.2	√		0.3 mm
	Diameter 16	Diameter 19 tebal 1.2	√	√	0.6 mm
Mandrel Dua Kepala Fleksibel	Diameter 16.3	Diameter 19 tebal 1.2	√		0.3 mm
	Diameter 16.3	Diameter 19 tebal 1.2	√		0.3 mm

Hasil eksperimen yang ditampilkan dalam tabel menunjukkan pengaruh variasi tipe dan dimensi mandrel terhadap kualitas hasil pembengkokan pipa menggunakan metode rotary draw bending. Secara umum, dapat diamati bahwa jenis mandrel yang digunakan, baik tanpa kepala, satu kepala, maupun dua kepala fleksibel, memiliki kontribusi signifikan terhadap kualitas permukaan pipa, tingkat kerutan, dan toleransi dimensi bagian dalam pipa (in-tube tolerance).

Pada penggunaan mandrel tanpa kepala fleksibel, seluruh variasi menghasilkan permukaan pipa yang halus, namun masih terdapat kerutan pada beberapa sampel, terutama pada dimensi mandrel yang lebih kecil. Seiring peningkatan diameter mandrel, tampak bahwa kerutan mulai berkurang dan toleransi terhadap dimensi bagian dalam pipa juga menurun, dari 0.8 mm menjadi 0.2 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar diameter mandrel, semakin baik kemampuan menahan deformasi pipa saat proses pembengkokan.

Sementara itu, penggunaan mandrel satu kepala fleksibel memberikan hasil yang lebih baik dalam hal pengendalian kerutan dan presisi dimensi. Pipa yang dibentuk dengan mandrel tipe ini tidak hanya memiliki permukaan yang tetap halus, tetapi juga menunjukkan pengurangan kerutan dan penyimpangan dimensi yang lebih rendah dibanding mandrel tanpa kepala. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa penambahan satu kepala pada mandrel memberikan dukungan tambahan dalam mempertahankan bentuk bagian dalam pipa.

Mandrel dua kepala fleksibel menunjukkan performa paling unggul di antara ketiganya. Hasil pembengkokan yang dihasilkan umumnya memiliki permukaan yang halus, bebas kerutan, serta toleransi in-tube yang sangat rendah, bahkan hingga 0.2 mm. Keberadaan dua kepala pada mandrel terbukti sangat efektif dalam memberikan dukungan struktural terhadap pipa selama proses pembengkokan berlangsung, sehingga deformasi dapat diminimalkan dan bentuk akhir pipa lebih akurat.

Pada pipa berukuran lebih kecil dengan diameter luar 19 mm dan ketebalan 1.2 mm, mandrel dengan diameter sekitar 16.3 mm tetap mampu menghasilkan permukaan yang baik dengan toleransi dimensi yang rendah. Ini menunjukkan bahwa kesesuaian antara dimensi mandrel dan diameter dalam pipa merupakan faktor penting untuk menghasilkan pembengkokan yang presisi dan berkualitas.

### **Analisa Mandrel tanpa kepala fleksibel 28.2 mm**



Gambar 2. mandrel tanpa kepala 28.2 mm

Analisis terhadap penggunaan mandrel tanpa kepala fleksibel dengan diameter 28.2 mm menunjukkan bahwa meskipun proses pemasukan pipa ke dalam jig bending berlangsung dengan sangat mudah, hal ini justru menimbulkan konsekuensi negatif terhadap kualitas hasil pembengkokan [6]. Mudahnya pemasukan material disebabkan oleh selisih yang cukup besar antara diameter mandrel (28.2 mm) dan diameter dalam pipa (29 mm), sehingga menghasilkan toleransi sebesar 0.8 mm. Toleransi ini tergolong besar dalam konteks rotary draw bending, di mana stabilitas geometrik dan kontak penuh antara dinding dalam pipa dan permukaan mandrel sangat menentukan integritas hasil akhir [7].

Ketika toleransi terlalu besar, bagian dalam pipa pada sisi tekan (inner radius) tidak mendapat penopang yang cukup dari mandrel selama proses bending berlangsung. Akibatnya, gaya tekan yang timbul selama pembengkokan tidak terdistribusi secara merata dan mengakibatkan terjadinya wrinkling atau kerutan parah pada bagian dalam lengkungan. Fenomena ini disebabkan oleh terjadinya local buckling, di mana dinding dalam pipa kehilangan kestabilannya akibat tidak adanya resistansi yang memadai dari mandrel.

### **Analisa Mandrel tanpa kepala fleksibel 28.4 mm**



Gambar 3. Mandrel tanpa kepala 28.4 mm

Penelitian dengan menggunakan mandrel tanpa kepala fleksibel berdiameter 28.4 mm menunjukkan adanya perbaikan kualitas hasil bending dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan mandrel berdiameter 28.2 mm. Walaupun kerutan (wrinkling) masih terjadi pada bagian dalam lengkungan pipa, intensitas dan keparahannya lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecil pada diameter mandrel ternyata memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pengendalian deformasi dinding pipa selama proses pembengkokan [8].

Toleransi antara diameter dalam pipa (sekitar 29 mm) dan diameter mandrel sebesar 28.4 mm adalah 0.6 mm. Dibandingkan dengan toleransi sebelumnya yang sebesar 0.8 mm, penurunan ini menghasilkan peningkatan kontak antara permukaan mandrel dan dinding dalam pipa. Dengan kata lain, meskipun belum sepenuhnya optimal, penopang yang diberikan oleh mandrel terhadap dinding bagian dalam pipa sudah lebih baik dalam menahan tekanan kompresif yang terjadi pada area radius dalam saat pembengkokan. Akibatnya, stabilitas lokal dinding pipa meningkat, dan risiko terjadinya local buckling yang mengarah pada kerutan berkurang.

Proses pemasukan material ke dalam jig bending juga masih berjalan dengan lancar. Ini menunjukkan bahwa meskipun diameter mandrel bertambah, toleransi yang masih cukup memberikan ruang bebas memadai untuk pergerakan pipa selama proses pengaturan posisi awal. Namun, toleransi sebesar 0.6 mm tetap menyisakan sedikit ruang bebas yang memungkinkan terjadinya gerakan longitudinal atau rotasi ringan pipa, yang dapat memicu terbentuknya kerutan kecil selama proses bending berlangsung

#### **Analisa Mandrel satu kepala fleksibel 28.2 mm**



Gambar 4. Mandrel satu kepala fleksibel 28.2 mm

Pada penelitian kedua, digunakan mandrel berdiameter 28.2 mm namun dilengkapi dengan satu kepala fleksibel. Penambahan satu kepala ini secara teoritis bertujuan untuk memberikan dukungan tambahan pada dinding dalam pipa selama proses pembengkokan, guna meminimalkan risiko deformasi seperti wrinkling. Meskipun secara praktik proses pemasukan material ke dalam jig bending tetap berlangsung dengan mudah—karena adanya toleransi sebesar 0.8 mm antara mandrel dan diameter dalam pipa—hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pembentukan kerutan (wrinkling) tetap terjadi secara signifikan.

Kerutan yang dihasilkan pada pembengkokan ini hampir setara dengan yang terjadi pada penggunaan mandrel tanpa kepala dengan diameter yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan satu kepala fleksibel belum mampu memberikan penopang yang cukup efektif ketika diameter mandrel terlalu kecil dibandingkan diameter dalam pipa. Dalam konteks ini, kepala fleksibel tidak memiliki kontak permukaan yang cukup luas atau kuat untuk menahan tekanan kompresif di sisi dalam lengkungan saat pipa dibengkokkan. Akibatnya, dinding dalam pipa tetap mengalami local buckling yang menimbulkan kerutan. Fenomena ini mempertegas bahwa efektivitas kepala fleksibel sebagai penopang tidak dapat berdiri sendiri; fungsinya sangat bergantung pada proporsi geometri antara mandrel dan pipa. Bila diameter mandrel terlalu jauh di bawah diameter dalam pipa, maka sekalipun dilengkapi dengan kepala fleksibel, penopangan yang terjadi tetap bersifat terbatas dan tidak menyeluruh. Hal ini memperlemah kemampuan mandrel dalam menjaga kestabilan lokal pipa, khususnya di area zona tekan (compression zone) yang menjadi titik rawan terhadap kerutan [9].

### Analisa Mandrel satu kepala fleksibel 28.4 mm



Gambar 5. Mandrel satu kepala 28.4 mm

Pada penelitian yang menggunakan mandrel satu kepala fleksibel dengan diameter 28.4 mm, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kerutan atau *wrinkling* masih tetap terjadi pada bagian dalam pipa setelah proses pembengkokan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan satu kepala fleksibel belum memberikan dampak signifikan dalam mengatasi deformasi lokal, meskipun secara teoritis kepala fleksibel dirancang untuk memberikan dukungan tambahan terhadap dinding dalam pipa yang mengalami tekanan kompresif saat dibengkokkan.

Menariknya, hasil bending yang diperoleh hampir identik dengan hasil pada penggunaan mandrel tanpa kepala fleksibel dengan diameter yang sama, yaitu 28.4 mm. Kedua skenario tersebut menghasilkan pola kerutan yang serupa, baik dalam bentuk maupun intensitasnya. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi toleransi sebesar 0.6 mm—yang merupakan selisih antara diameter dalam pipa (29 mm) dan diameter mandrel—kehadiran satu kepala fleksibel tidak cukup efektif dalam menahan gaya tekan yang timbul selama proses pembengkokan [7].

### Analisa Mandrel tanpa kepala fleksibel 16 mm



Gambar 6. Mandrel tanpa kepala 16 mm

Pada penelitian ini, proses pembengkokan dilakukan terhadap pipa dengan diameter luar 19 mm dan ketebalan dinding 1.2 mm, yang berarti diameter dalam pipa mendekati 16.6 mm. Mandrel yang digunakan dalam proses ini adalah mandrel tanpa kepala fleksibel dengan diameter 16.0 mm, sehingga terdapat toleransi sebesar 0.6 mm antara mandrel dan lubang dalam pipa.

Toleransi sebesar 0.6 mm dalam konteks pipa berdiameter relatif kecil seperti ini tergolong cukup signifikan, mengingat dimensi internal pipa yang lebih sempit membuat ruang gerak atau celah antara mandrel dan permukaan dalam pipa memiliki dampak yang lebih besar terhadap kestabilan selama proses pembengkokan. Mandrel dengan diameter 16.0 mm tidak sepenuhnya mengisi volume internal pipa, sehingga pada saat proses bending berlangsung, bagian dalam radius pipa tetap mengalami tekanan kompresif yang tidak sepenuhnya tertahan. Kondisi ini berpotensi menimbulkan deformasi seperti ovalisasi atau bahkan *wrinkling* (kerutan) apabila gaya tekan tidak terdistribusi merata.

### Analisa Mandrel tanpa kepala fleksibel 16.3 mm



Gambar 71. Mandrel tanpa kepala 16.3 mm

Pada penelitian ini, digunakan mandrel tanpa kepala fleksibel dengan diameter 16.3 mm untuk proses *rotary draw bending* pada pipa yang memiliki diameter luar 19 mm dan ketebalan dinding 1.2 mm. Dari spesifikasi tersebut, diameter dalam pipa berkisar 16.6 mm, sehingga toleransi antara mandrel dan lubang dalam pipa adalah 0.3 mm. Toleransi yang relatif kecil ini terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas hasil pembengkokan.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses bending berjalan dengan sangat baik, ditandai dengan tidak ditemukannya kerutan (*wrinkling*) pada bagian dalam radius pipa. Ketidadaan kerutan ini menandakan bahwa dinding pipa, khususnya pada sisi tekan, mendapatkan dukungan struktural yang cukup dari permukaan mandrel selama proses deformasi plastis. Mandrel yang hampir sepenuhnya mengisi ruang dalam pipa memungkinkan gaya tekan selama bending terdistribusi merata, sehingga menghindarkan terjadinya *local buckling*, yang umumnya menjadi penyebab utama terbentuknya kerutan pada hasil bending[10].

Keberhasilan proses ini menunjukkan bahwa untuk pipa berdimensi kecil, pemilihan diameter mandrel yang mendekati nilai diameter dalam pipa sangat krusial. Toleransi sebesar 0.3 mm tampaknya menjadi ambang ideal, di mana mandrel masih cukup presisi untuk menghindari cacat bentuk, namun tidak mengorbankan kelancaran dalam penanganan material. Selain itu, meskipun mandrel yang digunakan tidak memiliki kepala fleksibel, hasil yang diperoleh tetap optimal. Ini menunjukkan bahwa dengan konfigurasi dimensi yang tepat, mandrel polos pun dapat memberikan hasil pembengkokan berkualitas tinggi tanpa memerlukan tambahan mekanisme penopang.

### Analisa Mandrel satu kepala fleksibel 16 mm



Gambar 8. Mandrel satu kepala 16 mm

Pada tahap lanjutan penelitian ini, setelah diperoleh hasil yang masih menunjukkan kerutan (wrinkling) pada proses pembengkokan menggunakan mandrel tanpa kepala fleksibel berdiameter 16.0 mm, dilakukan pendekatan perbaikan dengan mengganti jenis mandrel yang digunakan menjadi mandrel satu kepala fleksibel dengan diameter yang sama, yakni 16.0 mm. Langkah ini diambil sebagai respons terhadap kelemahan mendasar pada mandrel polos, yaitu ketidakmampuannya memberikan dukungan longitudinal yang cukup pada dinding bagian dalam pipa selama proses bending, khususnya ketika toleransi antara mandrel dan diameter dalam pipa relatif besar.

Mandrel satu kepala fleksibel dirancang dengan tujuan untuk memberikan penopang tambahan di ujung mandrel, terutama pada area yang paling rentan mengalami tekanan kompresif—yakni sisi dalam dari lengkungan pipa saat proses bending berlangsung. Penambahan kepala fleksibel diharapkan mampu menahan atau menghambat gerakan melipat (buckling) pada dinding pipa yang tidak tertopang penuh oleh mandrel polos, serta mendistribusikan beban secara lebih merata di sepanjang zona tekukan [11].

Namun, karena diameter mandrel tetap 16.0 mm dan diameter dalam pipa adalah 16.6 mm (pipa berdinding 1.2 mm dan diameter luar 19 mm), toleransi tetap berada pada angka 0.6 mm. Ini berarti, meskipun terdapat kepala fleksibel, permukaan penopang dari mandrel belum sepenuhnya bersentuhan secara menyeluruh dengan dinding dalam pipa. Kepala fleksibel yang ada hanya bekerja secara lokal dan terbatas, sehingga efektivitasnya dalam mengurangi kerutan masih sangat tergantung pada panjang, kelenturan, dan posisi kepala tersebut selama proses bending berlangsung.

### Analisa Mandrel satu kepala fleksibel 16.3 mm



Gambar 9. Mandrel satu kepala 16.3 mm

Pada penelitian ini, digunakan mandrel satu kepala fleksibel dengan diameter 16.3 mm untuk proses pembengkokan pipa berdiameter luar 19 mm dan tebal 1.2 mm (diameter dalam  $\pm 16.6$

mm), sehingga diperoleh toleransi sebesar 0.3 mm terhadap lubang dalam pipa. Tujuan utama dari penggunaan satu kepala fleksibel adalah untuk mengevaluasi apakah penambahan kepala penopang dapat memberikan keunggulan tambahan dibandingkan mandrel polos (tanpa kepala) dengan diameter yang sama, khususnya dalam hal kestabilan bentuk, konsistensi dimensi, dan pengendalian kerutan (wrinkling).

Hasil yang diperoleh dari penggunaan mandrel satu kepala fleksibel menunjukkan performa pembengkokan yang sangat baik. Permukaan hasil bending tampak halus dan bebas dari kerutan, yang menunjukkan bahwa kepala fleksibel mampu memberikan penopang tambahan secara efektif pada sisi dalam pipa saat mengalami tekanan kompresif selama pembengkokan. Ini menunjukkan bahwa kepala fleksibel bekerja sebagai elemen penyeimbang gaya deformasi, menjaga agar dinding pipa tidak mengalami local buckling bahkan ketika berada dalam zona lengkung yang kritis.

Menariknya, ketika dibandingkan dengan hasil dari mandrel polos (tanpa kepala) dengan diameter yang sama (16.3 mm), perbedaan kualitas hasil bending hanya sangat kecil. Dari sepuluh kali proses pembengkokan yang dilakukan secara berulang, hanya terdapat selisih ukuran hasil akhir sekitar 0.2 mm. Ini menunjukkan bahwa meskipun kepala fleksibel memiliki kontribusi dalam menjaga kestabilan bentuk, pada toleransi sekecil 0.3 mm, mandrel polos sudah cukup efektif dalam menahan deformasi pipa secara menyeluruh. Hal ini bisa disebabkan oleh fakta bahwa pada dimensi ini, mandrel sudah hampir sepenuhnya mengisi ruang dalam pipa, sehingga gaya tekan selama pembengkokan telah tertopang dengan baik oleh permukaan mandrel itu sendiri.

Namun demikian, keberadaan kepala fleksibel tetap memiliki nilai fungsional dalam hal menjaga konsistensi hasil pada kondisi proses yang lebih dinamis atau ketika terjadi variasi kecil pada kualitas material atau tekanan mesin bending. Kepala fleksibel berfungsi sebagai lapisan perlindungan tambahan yang meredam fluktuasi gaya saat pembengkokan, sehingga menghasilkan kualitas lengkung yang lebih konsisten dari satu siklus ke siklus berikutnya.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil beberapa proses rotary draw bending pipa tube stainless steel SUS 304 dapat disimpulkan, bahwa toleransi mandrel 0.8 mm, 0.6 mm dari diameter lubang pipa di pastikan mengalami wrinkling atau berkerut baik tanpa kepala fleksibel maupun dengan kepala fleksibel. Dan untuk proses toleransi mandrel 0.2 mm, 0.3 mm dan 0.4 mm dari diameter lubang pipa hasilnya halus dan tidak ada kerutan baik tanpa kepala fleksibel maupun dengan kepala fleksibel. Baris pertama dari chapter tertentu.

Untuk ukuran toleransi mandrel yang tepat sehingga mudah dalam proses memasukan ataupun melepas, Agar proses rotary draw bending erjalan dengan baik yaitu 0.3 mm dan 0.4 mm dari diameter dalam pipa, Baik tanpa kepala fleksibel maupun dengan kepala fleksibel.

#### Daftar Pustaka

- [1] A. Husen, A. Fato, and N. Nursidik, "Analisa Sifat Mekanis Baja Pada Bahan Spcc-Hd Dengan Proses Deep Curling Dalam Pembuatan Drum," *Presisi*, vol. 23, no. 1, pp. 60–74, 2021.
- [2] H. N. Beliu, Y. M. Pell, and J. U. Jasron, "Analisa kekuatan tarik dan bending pada komposit widuri-polyester," *Lontar J. Tek. Mesin Undana*, vol. 3, no. 2, pp. 11–20, 2016.
- [3] R. Sumiati, G. Ramadeto, R. Rakiman, and F. Fardinal, "Pembuatan Dan Pengujian Mesin Bending Rotary Baja Untuk Aplikasi Stand Pot Bunga Diameter 8 dan 10 Inch," *J. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 13–17, 2020.

- [4] M. Sayuti, “PENGANTAR PENGOLAHAN BAHAN LOGAM.” SEFA BUMI PERSADA, Anggota IKAPI: No. 021/DIA/2018, 2019.
- [5] A. Syadidan, M. I. P. Hidayat, and W. Jatimurti, “Simulasi Springback pada Laser Beam Bending dan Rotary Draw Bending untuk Pipa AISI 304L.” Sepuluh Nopember Institute of Technology, 2018.
- [6] A. Andri and S. Ghina, “RANCANG ALAT BENDING KAWAT METAL JIG.” Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, 2020.
- [7] J. Tumanggor, “Analisa Mesin Pembengkok Pipa,” 2007.
- [8] L. S. Nugroho, “Pengaruh proses annealing terhadap perubahan kekerasan dan struktur mikro pada pipa SA 179 yang telah mengalami pembengkokan,” *Didapat Kembali dari Tugas Akhir Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2017.
- [9] M. Saripuddin, *Mengenal Logam Sebagai Bahan Teknik*. Deepublish, 2021.
- [10] O. Markov, O. Gerasimenko, A. Khvashchynskyi, R. Zhytnikov, and R. Puzyr, “Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel,” *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, no. 3 (1), pp. 42–48, 2019.
- [11] L. Jiang *et al.*, “A new mandrel design with mandrel ball thickness variation for the bending process of aviation ultra-thin-walled tubes,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 122, no. 3, pp. 1805–1819, 2022.