ANALISIS PERBANDINGAN KARAKTERISTIK *PIG FOAM* BERBASIS POLYOL POLYETHER DAN POLYOL POLYESTER UNTUK APLIKASI *PIGGING* PADA SISTEM PERPIPAAN

Muhammad Amar Sidiq[1], Tun Sriana[1]*
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan gajah mada 38, Cepu 58315, Blora, Jawa Tengah
**E-mail*: tun.sriana@gmail.com

ABSTRAK

Pigging merupakan salah satu metode pemeliharaan sistem perpipaan yang digunakan untuk menjaga kebersihan dan keandalan pipa. Pengembangan *foam pig* berbasis polyurethane menjadi salah satu alternatif karena memiliki sifat fleksibel dan mampu menyesuaikan diri terhadap kontur bagian dalam pipa. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik *pig foam* berbasis polyol polyether dan polyol polyester untuk menentukan material yang lebih sesuai sebagai media *pigging*. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui *cup test* dengan formulasi polyol, *methylene diphenyl diisocyanate*, *amine catalyst*, dan air, kemudian diamati berdasarkan *cream time*, *rise time*, *gel time*, *tack-free time*, *free rise density*, *shrinkage*, dan kelenturan secara organoleptik. Hasil menunjukkan bahwa polyether lebih unggul dibandingkan polyether. Dimana polyether tidak mengalami *shrinkage* dan memiliki kelenturan lebih baik, meskipun masih ditemukan *void* dan density belum memenuhi target 130 kg/m³. Berdasarkan hasil tersebut, sampel yang menggunakan polyol jenis polyether dipilih sebagai material yang lebih potensial dan dilanjutkan ke tahap *molding* menggunakan *silicone mold release*, *curing*, serta pelapisan *polyurethane rubber coat*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diantara dua jenis polyol yaitu polyether dan polyester, dapat memengaruhi terhadap karakteristik pembentukan dan sifat akhir polyurethane foam, dengan polyether memberikan kombinasi karakteristik yang lebih sesuai untuk dikembangkan sebagai material *foam pig*.

Kata kunci: *foam pig*, polyurethane, polyether, polyester, pigging, *Free Rise Density*, kelenturan.

1. PENDAHULUAN

Sistem perpipaan merupakan komponen penting dalam industri minyak dan gas bumi (migas), petrokimia, serta industri proses lainnya karena berfungsi sebagai media transportasi fluida antarunit operasi. Selama pengoperasian, permukaan bagian dalam pipa rentan mengalami akumulasi deposit seperti *wax*, *scale*, *sludge*, dan residu hidrokarbon yang dapat meningkatkan *pressuredrop*, menurunkan laju alir, serta mempercepat korosi. Salah satu metode pemeliharaan yang umum digunakan adalah *pigging*, yaitu proses menjalankan *pig* di dalam pipa menggunakan tekanan fluida untuk membersihkan deposit tanpa menghentikan operasi. Keberhasilan proses ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik material *pig*, terutama kemampuan mengikuti kontur pipa dan mempertahankan kontak dengan dinding pipa selama proses pembersihan.

Salah satu material yang banyak dikembangkan sebagai media *pigging* adalah *flexible polyurethane foam* karena memiliki bobot ringan, elastisitas tinggi, dan kemampuan deformasi yang baik. *Polyurethane foam* terbentuk melalui reaksi antara *polyol* dan isosianat dengan bantuan air sebagai *blowing agent* yang menghasilkan struktur sel berpori (*cellular structure*) [1]. Karakteristik *foam* sangat dipengaruhi oleh jenis *polyo*l yang digunakan. *Polyether polyol*

menghasilkan *foam* yang lebih fleksibel, memiliki ketahanan hidrolisis yang baik, serta kemampuan *shape recovery* yang tinggi. Sebaliknya, *polyester polyol* menghasilkan *foam* dengan kekuatan mekanik, ketahanan abrasi, dan ketahanan terhadap minyak yang lebih baik, namun cenderung memiliki fleksibilitas yang lebih rendah [2]. Perbedaan karakteristik tersebut menjadikan kedua jenis *polyol* berpotensi memberikan performa yang berbeda ketika diaplikasikan sebagai *pig foam*.

Untuk mengevaluasi kelayakan foam sebagai media *pigging*, penelitian ini difokuskan pada dua parameter utama, yaitu *free rise density* dan kelenturan. *Free rise density* digunakan untuk menentukan densitas *foam* hasil ekspansi bebas yang berpengaruh terhadap bobot, struktur sel, dan kekuatan mekanik material, sedangkan pengujian kelenturan bertujuan mengetahui kemampuan *foam* kembali ke bentuk semula setelah mengalami kompresi. Berdasarkan ASTM D-3574 untuk kelas *polyurethane high density* memiliki nilai densitas minimal sejumlah 130 kg/m^3. Kedua parameter tersebut merupakan karakteristik penting yang menentukan kemampuan *foam* dalam melewati tikungan, penyempitan pipa, serta mempertahankan kontak dengan dinding pipa selama proses *pigging*[1].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan karakteristik *pig foam* berbasis *polyol polyether* dan *polyol polyester* untuk aplikasi *pigging* pada sistem perpipaan. Penelitian dilakukan dengan membandingkan karakteristik *foam* yang dihasilkan berdasarkan parameter *free rise density* dan kelenturan, sehingga diperoleh jenis *polyol* yang paling sesuai sebagai bahan baku *foam pig* untuk mendukung efektivitas pemeliharaan sistem perpipaan. Meskipun karakteristik foam pada setiap basis sudah diketahui secara umum, pengujian komparatif secara spesifik untuk material dasar foam pig berdensitas tinggi masih perlu dibuktikan secara eksperimen.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan observasi untuk membandingkan karakteristik *pig foam* berbasis *polyether polyol* dan *polyester polyol* sebagai material *pigging* pada sistem perpipaan. Pembuatan *foam* diawali dengan *cup test* menggunakan dua jenis *polyol*, yaitu *polyether polyol* dan *polyester polyol*, dengan masing-masing formulasi dibuat secara duplo untuk meningkatkan reliabilitas hasil pengujian. Setiap formulasi disiapkan melalui pencampuran *polyol*, isosianat, *silicone surfactant*, katalis, dan *blowing agent* hingga membentuk campuran homogen yang kemudian mengalami proses *foaming*. Selama proses tersebut dilakukan pengamatan terhadap *cream time*, *rise time*, *gel time*, dan *tack free time* untuk mengevaluasi karakteristik reaksi pembentukan *polyurethane foam*. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan laju reaksi antara *polyol* dan isosianat serta kestabilan proses pembentukan struktur sel selama *foaming* [2].

Proses *cup test* dilakukan untuk mengamati karakteristik reaksi dan pembentukan *polyurethane foam* sebelum material dikembangkan menjadi *pig foam*. Tahap awal dilakukan dengan menimbang bahan baku sesuai komposisi yang telah ditentukan, yaitu 20 g *polyol*, 15 g *isocyanate* MDI, 0,15 g *amine catalyst*, dan 0,30 g air. *Polyol* terlebih dahulu dicampurkan dengan *amine catalyst* hingga homogen, kemudian *isocyanate* MDI dan air ditambahkan ke dalam campuran. Setelah seluruh bahan dimasukkan, campuran dilakukan *mixing* selama 10 detik di dalam *cup* untuk memulai proses reaksi dan pembentukan *foam*. Dalam reaksi tersebut, air bereaksi dengan gugus isosianat menghasilkan CO_2 yang berperan sebagai gas pengembang, sedangkan reaksi antara *polyol* dan MDI membentuk jaringan *polyurethane*. Setelah pencampuran, perubahan karakteristik campuran diamati secara kontinu melalui *cream time*, *rise time*, *gel time*, dan *tack-free time*.

Cream time merupakan waktu sejak bahan mulai bereaksi hingga *foam* mulai mengalami kenaikan volume atau ekspansi. Setelah memasuki tahap tersebut, *foam* terus mengalami ekspansi hingga mencapai kondisi pengembangan maksimum yang ditandai dengan *rise time*, yaitu waktu ketika proses pengembangan *foam* telah selesai. Interval antara *cream time* dan *rise time* menggambarkan periode utama terjadinya ekspansi *foam*. Selanjutnya, *gel time* menunjukkan waktu ketika material mulai membentuk jaringan polimer yang ditandai dengan munculnya *string* ketika permukaan *foam* diuji menggunakan tusuk. Tahap ini menunjukkan bahwa struktur *foam* mulai mengalami penguatan akibat pembentukan jaringan polimer. Setelah itu, *tack-free time* menunjukkan waktu ketika permukaan *foam* sudah tidak lagi lengket. Secara berurutan, *gel time* diharapkan tercapai sebelum *tack-free time*, karena pembentukan jaringan polimer berlangsung sebelum permukaan *foam* mencapai kondisi tidak lengket.

Setelah mencapai *tack-free time*, *foam* yang telah mengalami proses *curing* kemudian dikarakterisasi berdasarkan *Free Rise Density* (FRD), kelenturan, dan *shrink*. Pengujian *Free Rise Density* dilakukan dengan merapikan bagian *foam* yang menjulang keluar dari *cup* hingga diperoleh permukaan yang rata dengan batas *cup*. Pemotongan dilakukan untuk menghilangkan bagian *foam* yang mengalami ekspansi bebas di luar volume *cup*, sehingga pengukuran densitas dilakukan berdasarkan volume yang telah ditentukan. *Foam* yang telah dirapikan kemudian ditimbang menggunakan timbangan, dan massa yang diperoleh digunakan untuk menentukan FRD berdasarkan perbandingan massa *foam* terhadap volume *cup*. Pengujian FRD mengacu pada ASTM D3574 dan digunakan untuk mengetahui densitas *foam* hasil ekspansi bebas yang berkaitan dengan bobot, struktur sel, serta karakteristik mekanik material.

Selain densitas, kelenturan diamati untuk mengevaluasi kemampuan *foam* mengalami deformasi dan kembali mendekati bentuk semula setelah diberikan kompresi. Pengamatan ini dilakukan secara observasional untuk membandingkan tingkat kelenturan antara *foam* berbasis *polyol polyether* dan *polyol polyester*. Sementara itu, pengamatan *shrink* dilakukan untuk mengetahui kestabilan dimensi *foam* setelah proses *curing*. Penyusutan yang terjadi dapat memengaruhi kesesuaian dimensi *foam* terhadap diameter bagian dalam pipa serta kemampuan *foam pig* dalam mempertahankan kontak dengan dinding pipa selama proses *pigging*. Densitas dan kemampuan *shape recovery* merupakan karakteristik penting yang berkaitan dengan fleksibilitas dan performa *polyurethane foam* pada aplikasi yang mengalami deformasi berulang [3].

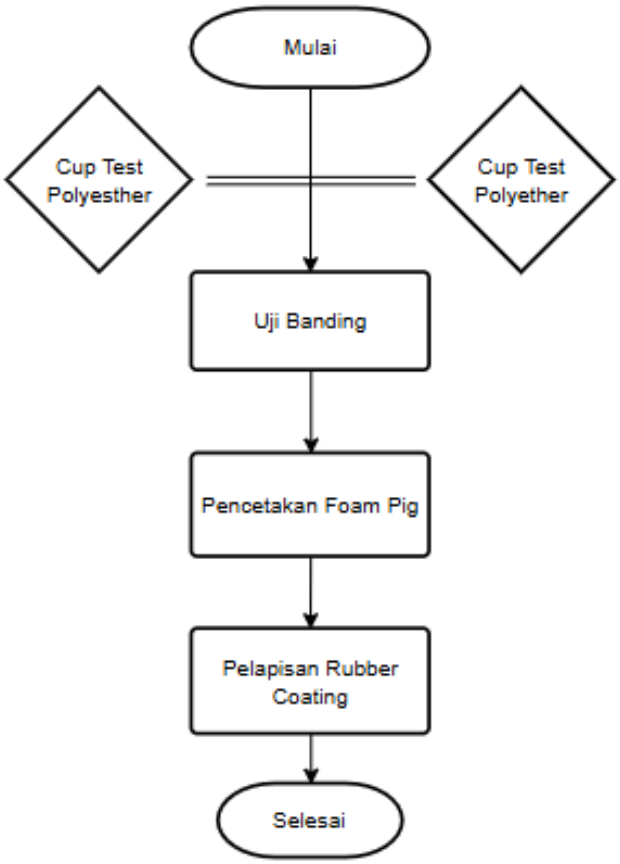
Berdasarkan seluruh parameter tersebut, karakteristik *foam* berbasis *polyether* dan *polyester* kemudian dibandingkan untuk menentukan formulasi yang paling sesuai sebagai material *foam pig*. Perbandingan tidak hanya didasarkan pada waktu reaksi, tetapi juga mempertimbangkan *Free Rise Density*, kelenturan, dan kestabilan dimensi (*shrink*). Waktu reaksi digunakan untuk melihat karakteristik pembentukan dan ekspansi *foam*, sedangkan FRD memberikan gambaran mengenai densitas hasil ekspansi bebas. Kelenturan digunakan sebagai pertimbangan kemampuan material mengikuti deformasi selama aplikasi, sementara *shrink* digunakan untuk mengevaluasi kestabilan dimensi setelah *curing*. Apabila karakteristik *foam* belum memenuhi kondisi yang diharapkan, formulasi dapat dievaluasi melalui penyesuaian jumlah air, konsentrasi katalis, atau rasio MDI terhadap *polyol*. Jumlah air memengaruhi pembentukan CO_2 dan proses ekspansi, sedangkan katalis memengaruhi keseimbangan laju *blowing* dan *gelling*. Rasio MDI terhadap *polyol* dapat dievaluasi apabila diperlukan peningkatan pembentukan jaringan *polyurethane* dan kestabilan struktur *foam*.

Formulasi yang menunjukkan karakteristik paling sesuai selanjutnya digunakan pada tahap pencetakan (*molding*) *pig foam* sesuai dimensi yang telah dirancang. Pada tahap ini, formulasi diperbesar sepuluh kali lipat dengan perbandingan komposisi yang sama, yaitu 200 g *polyol*, 150 g *isocyanate* MDI, 1,5 g *amine catalyst*, dan 3 g air. Sebelum proses pencetakan, permukaan *mold* diberi *silicone mold release* secara merata untuk mencegah *foam* melekat pada

cetakan dan mempermudah proses pelepasan setelah *curing*. Bahan kemudian dicampurkan selama 15 detik hingga homogen dan dituangkan ke dalam *mold*. Campuran selanjutnya dibiarkan mengalami ekspansi dan *curing* selama kurang lebih 45 menit hingga terbentuk *foam pig* sesuai bentuk cetakan.

Setelah proses pencetakan dan *curing* selesai, *pig foam* kemudian diberikan lapisan *polyurethane rubber coating* pada permukaannya. Pelapisan ini bertujuan meningkatkan ketahanan permukaan terhadap abrasi dan gesekan yang terjadi selama proses *pigging*, sehingga dapat meningkatkan ketahanan dan umur pakai *foam pig* tanpa menghilangkan sifat fleksibilitas material. Sebelum pelapisan, permukaan *foam pig* dipastikan dalam kondisi bersih dan kering. *Rubber coating* kemudian diaplikasikan secara merata dan dibiarkan mengering pada kondisi suhu ruang sekitar 25–30 °C tanpa menggunakan oven. Setelah lapisan mengering, dilakukan *finishing* untuk merapikan permukaan dan bagian-bagian yang masih berlebih.

Tahapan tersebut menghasilkan *foam pig* yang dikembangkan berdasarkan karakteristik material hasil *cup test* dan kemudian dibentuk sesuai dimensi yang dirancang. Dengan demikian, pemilihan jenis *polyol* tidak hanya mempertimbangkan keberhasilan pembentukan *foam*, tetapi juga mempertimbangkan kombinasi waktu reaksi, Free Rise Density, kelenturan, kestabilan dimensi, dan kemampuan material untuk dikembangkan menjadi produk *pig foam* yang memiliki ketahanan terhadap kondisi operasi *pigging* [4]



Gambar 1. *Flowchart* Metodologi

3. PEMBAHASAN

Pembuatan *pig foam* pada penelitian ini dilakukan menggunakan empat bahan utama, yaitu *polyol*, *isocyanate* jenis *methylene diphenyl diisocyanate* (MDI), *amine catalyst*, dan air dengan komposisi masing-masing sebesar 20 g, 15 g, 0,15 g, dan 0,30 g. *Polyol* berfungsi sebagai komponen utama pembentuk rantai *polyurethane* dan menjadi faktor pembeda karakteristik *foam* berbasis *polyether* dan *polyester*, sedangkan MDI berperan sebagai komponen isosianat yang bereaksi dengan gugus hidroksil pada *polyol* membentuk jaringan *polyurethane*. Air berfungsi sebagai *chemical blowing agent* melalui reaksinya dengan MDI yang menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) untuk membentuk dan mengembangkan struktur sel *foam*, sementara *amine catalyst* digunakan untuk mempercepat reaksi *blowing* dan *gelling* sehingga memengaruhi keseimbangan antara pembentukan gas dan pengerasan struktur *foam* [5].

Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) dipilih sebagai sumber isosianat karena mampu membentuk jaringan *polyurethane* dengan sifat mekanik yang baik dan umum digunakan dalam pembuatan *polyurethane foam*, sedangkan *amine catalyst* dipilih karena mampu mengontrol kinetika reaksi *blowing* dan *gelling* sehingga proses pembentukan *foam* dapat berlangsung pada waktu yang sesuai. Pemilihan kedua bahan tersebut juga mendukung penelitian komparatif karena formulasi dan kondisi reaksinya dapat dipertahankan tetap pada kedua jenis *polyol*, sehingga perbedaan karakteristik *foam* lebih dapat dikaitkan dengan jenis *polyol* yang digunakan.

Pada proses pembuatan *foam pig* berbasis *polyurethane*, terdapat dua reaksi utama yang berlangsung secara bersamaan, yaitu reaksi *gelling* (pembentukan *polyurethane*) dan reaksi *blowing* (pembentukan CO_2). Kedua reaksi tersebut saling berkaitan dalam pembentukan struktur *foam*. Reaksi *gelling* membangun jaringan polimer, reaksi *blowing* menghasilkan gas CO_2 yang menyebabkan ekspansi dan pembentukan sel. Keseimbangan antara proses pembentukan gas dan pembentukan jaringan polimer selanjutnya menentukan karakteristik *foam* yang dihasilkan.

$$R - OH + R' - NCO \rightarrow R - O - CO - NH - R \quad (1)$$

Reaksi *gelling* merupakan reaksi antara gugus hidroksil (–OH) pada *polyol* dengan gugus isosianat (–NCO) pada MDI. Reaksi ini menghasilkan ikatan *urethane* (–NH–CO–O–) dan berlangsung secara berulang sehingga membentuk rantai serta jaringan *polyurethane*. Pembentukan jaringan polimer tersebut menyebabkan campuran secara bertahap mengalami peningkatan viskositas dan kekuatan hingga struktur foam menjadi lebih stabil. Dalam proses pembentukan *foam pig*, reaksi ini berperan penting dalam menentukan kekuatan, elastisitas, dan kemampuan *foam* mempertahankan bentuk setelah mengalami ekspansi [6].

$$R - NCO + H2O \rightarrow R - NH - COOH \quad (2)$$

Pada tahap awal reaksi *blowing*, air bereaksi dengan gugus isosianat (–NCO) dari MDI dan menghasilkan senyawa antara berupa asam karbamat (*carbamic acid*). Senyawa ini bersifat tidak stabil dan hanya terbentuk sementara sebelum mengalami penguraian. Keberadaan air dalam formulasi menjadi penting karena reaksi ini merupakan tahap awal pembentukan gas yang diperlukan untuk proses ekspansi *foam*.

$$R - NH - COOH \rightarrow R - NH2 + CO2 \quad (3)$$

Asam karbamat yang terbentuk pada tahap sebelumnya kemudian mengalami dekomposisi menghasilkan amina dan gas CO_2. Gas CO_2 yang terbentuk berfungsi sebagai *blowing agent* internal yang menghasilkan gelembung di dalam campuran *polyurethane*. Gelembung tersebut selanjutnya berkembang selama proses ekspansi dan membentuk struktur sel *foam*. Oleh karena itu, reaksi pembentukan CO_2 sangat berkaitan dengan *rise time*, tingkat ekspansi, *density*, dan pembentukan struktur sel pada *foam pig* [7].

A. Hasil Cup Test Polyether

Hasil *cup test* polyethet ditampilkan pada Tabel 1. Dari tabel dapat dilihat bahwa berdasarkan hasil *cup test* pada formulasi berbasis polyether polyol, diperoleh *cream time* sebesar 25 detik, *rise time* 75 detik, *gel time* 105 detik, dan *tack-free time* 120 detik, dengan Free Rise Density sebesar 119,9 kg/m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pembentukan dan pengerasan foam berlangsung relatif cepat.

Tabel 1. Hasil *Cup Test* Polyether

Parameter	Hasil	Satuan
Polyol	Polyether	-
Cream time	25	Detik
Rise time	75	Detik
Gel time	105	Detik
Tack free time	120	Detik
Free Rise Density	119,9	kg/m³
Target Density	130	kg/m³
Keterangan organelepstik	• Terdapat banyak void • Tidak mengalami shrinkage • Berwarna putih • Memiliki fleksibilitas yang tinggi • Tekstur lunak	-

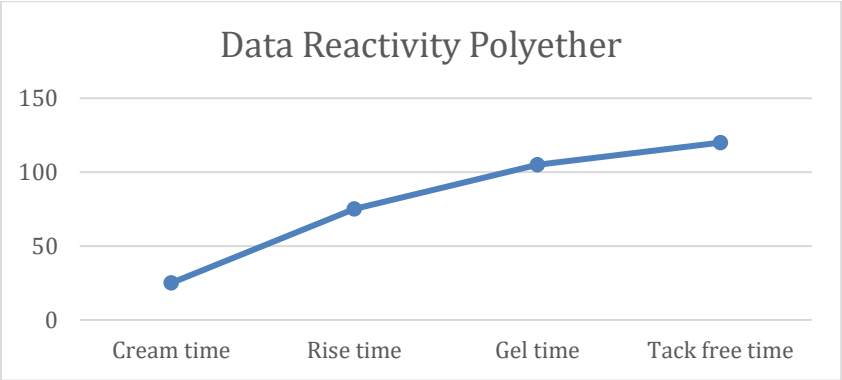
Secara visual, foam tidak mengalami shrinkage, meskipun masih ditemukan *void* pada struktur foam dan nilai density berada di bawah target 130 kg/m³. Dari hasil uji organoleptik yang telah dilakukan sampel polyether memiliki warna putih bersih dan memiliki tekstur yang lunak. Hal tersebut menunjukkan bahwa ikatan eter yang terkandung dalam *pig foam* bersifat jenuh, sehingga memiliki warna putih bersih, selain itu polyether memiliki kelenturan yang tinggi, dimana *pig foam* yang memiliki sifat yang lentur akan lebih mudah mengalami deformasi tanpa mudah mengalami kerusakan. Kondisi ini menjadi keunggulan penting untuk aplikasi *pig foam* karena material perlu mampu mengikuti kontur dan perubahan geometri bagian dalam pipa selama proses pigging. Meskipun demikian, keberadaan *void* dan density yang masih rendah menunjukkan bahwa formulasi polyether tetap memerlukan optimasi untuk memperoleh struktur sel yang lebih seragam. Penampakan visul *cup test* polyether ditunjukkan pada Gambar 2.



(a) (b)

Gambar 2. *Cup Test* Polyether (a) Penampakan samping (b) penampakan atas

Gambar 3. menunjukkan kurva reaktivitas sampel foam pig berbasis polyether polyol yang meningkat secara **monoton** dan berjenjang searah bertambahnya waktu, yaitu cream time 25 detik, rise time 75 detik, gel time 105 detik, dan tack-free time 120 detik. Keempat parameter tersebut diukur secara berurutan karena masing-masing merepresentasikan tahapan kimia yang berbeda dan tidak dapat saling mewakili dalam pembentukan busatan poliuretan. Urutan pengukuran cream → rise → gel → tack-free dipilih karena keempatnya merupakan satu rangkaian neraca gel–blow (gel–blow balance), yaitu cream time menunjukkan kapan reaksi dimulai, rise time kapan pengembangan berhenti, gel time kapan struktur mengeras, dan tack-free time kapan permukaan tuntas. Bagi aplikasi *pigging*, keempat data ini berfungsi sebagai jendela proses (processability window) yang akan menentukan berapa lama waktu menuang (*pouring*) dan mengunci cetakan (*demolding*) yang tersedia, serta memastikan pengembangan selesai sebelum struktur mengeras agar foam tidak retak maupun kolaps. Pada Grafik 1 terlihat pula bahwa jarak antara *gel time* dan *tack-free time* relatif pendek (105 → 120 detik, selisih 15 detik), yang mengindikasikan bahwa permukaan foam cepat mengering dan reaktivitas polyether polyol tergolong tinggi serta relatif seragam di seluruh bagian. Nilai *Free Rise Density* (FRD) sebesar 119,9 kg/m³ yang masih berada di bawah Target Density 130 kg/m³, serta masih adanya *void* pada produk, menunjukkan bahwa pengembangan masih terlalu besar relatif terhadap kekuatan dinding sel yang terbentuk — hal ini sejalan dengan reaktivitas tinggi yang membuat pengembangan berlangsung cepat sementara kekuatan dinding sel belum sepenuhnya terbentuk saat gel terjadi.



Gambar 3. Data Reaktivitas *Cup Test* Polyether

B. Hasil Cup Test Polyesther

Berdasarkan tabel hasil *cup test* polyester diperoleh *cream time* sebesar 270 detik, *rise time* 310 detik, *gel time* 350 detik, dan *tack-free time* 410 detik, dengan *Free Rise Density* sebesar 101,4 kg/m³. Dibandingkan polyether, proses pembentukan foam polyester berlangsung lebih lambat, namun memiliki jumlah *void* yang lebih sedikit. Namun, foam polyester masih mengalami shrinkage setelah proses pembentukan. Detail hasil *cup test* polyesther ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *Cup Test* Polyesther

Parameter	Hasil	Satuan
Polyol	Polyether	-
Polyol	Polyester	-
Cream time	270	Detik
Rise time	310	Detik
Gel time	350	Detik
Tack free time	410	Detik
Free Rise Density	101,4	kg/m³
Keterangan organelepstik	• Tidak ada void • Mengalami shrinkage • Berwarna putih kekuningan • Memiliki fleksibilitas yang rendah • Tekstur keras	-

Berdasarkan uji organoleptik yang didapatkan, polyester memiliki warna putih agak kekuningan dan memiliki kelenturan yang rendah dibandingkan polyether ke polyether. Hal tersebut menunjukkan bahwa ikatan jaringan polyesther memiliki cincin aromatik, sehingga warnanya jauh lebih kuning. Sedangkan kelenturan yang rendah akan membuat kemampuan

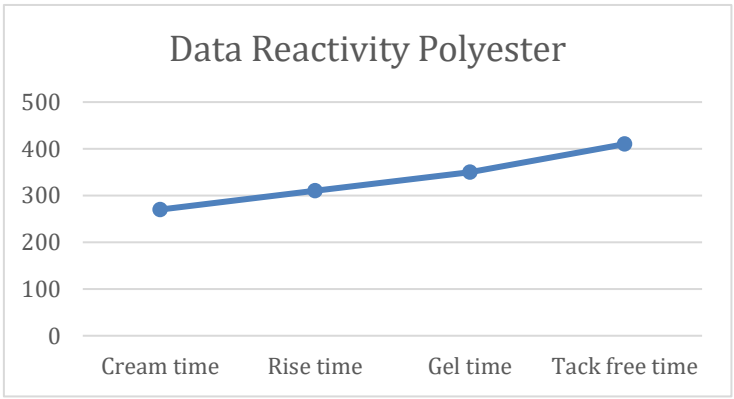
deformasinya untuk mengikuti kontur pipa dinilai kurang optimal. Kondisi tersebut menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan material karena foam pig membutuhkan kelenturan yang memadai untuk mempertahankan kontak dengan dinding pipa selama proses pembersihan. Gambaran visual *cup test* polyester ditunjukkan pada Gambar 4.



(a) (b)

Gambar 4. *Cup Test* Polyether (a) Penampakan samping (b) penampakan atas

Gambar 5. menunjukkan kurva reaktivitas sampel foam pig berbasis polyester polyol dengan pola yang naik berjenjang seiring waktu. Namun bergeser jauh ke kanan (ke waktu yang lebih lama) dan lebih landai secara keseluruhan, yaitu cream time 270 detik, rise time 310 detik, gel time 350 detik, dan tack-free time 410 detik. Artinya, seluruh tahapan reaksi polyester polyol berlangsung **3,3** hingga 10,8 kali lebih lambat dibandingkan polyether polyol pada kondisi formulasi dan rasio isosianat yang sama. Pengukuran keempat parameter ini pada polyester tetap penting dan justru menjadi bukti kuantitatif bahwa perbedaan jenis polyol mengubah kinetika pembentukan jaringan poliuretan. Pada Grafik 2 tampak bahwa jarak *gel time* ke *tack-free time* jauh lebih lebar (350 → 410 detik, selisih 60 detik) dibandingkan polyether, yang menandakan bahwa permukaan polyester foam tetap lengket (*tacky*) jauh lebih lama, sehingga membutuhkan waktu *curing* lebih panjang dan berpotensi menularkan cacat bila dilepas dari cetakan terlalu dini.



Gambar 5. Data Reaktivitas *Cup Test* Polyester

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, polyether dipilih sebagai material yang lebih unggul dan lebih potensial untuk dikembangkan sebagai basis foam pig. Polyether memiliki keunggulan pada waktu pembentukan foam yang lebih cepat, nilai densitas yang lebih mendekati, tidak mengalami shrinkage, serta memiliki kelenturan yang lebih baik berdasarkan uji organoleptik. Sementara itu, polyester memiliki keunggulan pada Free Rise Density memiliki jumlah *void* yang lebih rendah, tetapi masih mengalami shrinkage dan memiliki kelenturan yang lebih rendah. Untuk aplikasi *foam pig*, kelenturan dan kestabilan dimensi menjadi pertimbangan utama karena material harus mampu menyesuaikan diri dengan permukaan dan perubahan diameter pipa tanpa kehilangan bentuk maupun mengalami kerusakan. Oleh karena itu, polyether dipilih sebagai basis yang lebih sesuai, dengan tahap optimasi selanjutnya difokuskan pada pengurangan *void* dan peningkatan density menuju nilai target tanpa mengurangi kelenturan dan kestabilan dimensinya.

Selanjutnya memasuki tahapan *molding foam pig* menggunakan basis yang terpilih. *Molding* merupakan proses pembentukan material foam dengan menempatkan campuran polyurethane ke dalam mold/cetakan sehingga material mengalami ekspansi dan *curing* mengikuti bentuk serta dimensi cetakan yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, proses *molding* dilakukan menggunakan silicone mold release yang diaplikasikan pada permukaan cetakan sebelum foam dituangkan. *Silicone mold release* digunakan sebagai agen pelepas (release agent) untuk membentuk lapisan pemisah antara polyurethane foam dan permukaan mold, sehingga foam yang telah mengalami *curing* dapat dilepaskan dengan lebih mudah serta mengurangi risiko foam menempel, robek, atau mengalami kerusakan permukaan saat proses *demolding*. Penggunaan *release agent* juga membantu mempertahankan bentuk dan kualitas permukaan produk hasil cetakan.

Proses *molding* diawali dengan menyiapkan bahan menggunakan formulasi terbaik yang telah diperoleh pada tahap *cup test*, yaitu polyol 20 g, Iso MDI 15 g, amine catalyst 0,15 g, dan air 0,30 g, dengan seluruh komposisi dikalikan 10 kali lipat sehingga masing-masing bahan menjadi 200 g, 150 g, 1,5 g, dan 3 g. Seluruh bahan kemudian dicampurkan dengan urutan yang sama seperti pada *cup test* dan dilakukan mixing selama 15 detik hingga campuran homogen dan reaksi pembentukan foam berlangsung. Sementara itu, permukaan bagian dalam mold terlebih dahulu dilapisi *silicone mold release* secara merata menggunakan kuas untuk mencegah adhesi foam terhadap cetakan. Setelah pelapisan selesai, campuran polyurethane dituangkan ke dalam mold dan dibiarkan mengalami proses ekspansi serta *curing* selama sekitar 45 menit. Setelah waktu tersebut tercapai, foam dikeluarkan dari mold untuk diamati bentuk, kondisi permukaan, keseragaman struktur, serta kesesuaian dimensinya sebagai foam pig.

Setelah proses *molding* dan *curing* selesai, foam pig selanjutnya diberikan polyurethane rubber coat sebagai lapisan pelindung permukaan. Pelapisan ini bertujuan meningkatkan ketahanan terhadap abrasi dan gesekan yang terjadi ketika foam pig bergerak sepanjang bagian dalam pipa, sekaligus membantu melindungi struktur foam dari kerusakan mekanis. Polyurethane dipilih sebagai material *rubber coat* karena memiliki kombinasi sifat fleksibilitas, ketahanan abrasi, ketahanan terhadap deformasi, dan daya tahan mekanik yang sesuai untuk aplikasi yang mengalami kontak dan gesekan berulang. Lapisan juga diharapkan tetap mengikuti deformasi foam sehingga tidak mudah retak atau terkelupas ketika foam pig mengalami kompresi saat melewati pipa.

Proses pelapisan dilakukan setelah foam pig dikeluarkan dari mold dan permukaannya dipastikan bersih, kering, serta bebas dari sisa silicone mold release. *Polyurethane rubber coat* kemudian diaplikasikan secara merata pada seluruh permukaan foam pig dengan memperhatikan ketebalan lapisan agar perlindungan permukaan dapat diperoleh tanpa mengurangi fleksibilitas foam. Setelah pelapisan selesai, foam pig dibiarkan hingga lapisan mengalami proses drying/curing. Proses *drying* dilakukan pada suhu ruang sekitar 25–30°C

dengan menempatkan foam pig pada area terbuka dan berventilasi baik, sehingga pada tahap ini tidak memerlukan oven atau alat pemanas khusus. Foam pig dibiarkan selama waktu pengeringan yang sesuai dengan jenis polyurethane coating yang digunakan hingga lapisan tidak lagi lengket dan cukup kuat untuk ditangani. Pengeringan pada suhu ruang dipilih untuk menghindari pemanasan berlebih yang berpotensi memengaruhi struktur dan kelenturan polyurethane foam. Setelah lapisan mengering, dilakukan tahap finishing dengan merapikan permukaan coating yang tidak merata, menghilangkan sisa coating pada bagian yang tidak diinginkan, serta memastikan lapisan menutupi permukaan foam pig secara merata. Foam pig kemudian dibiarkan mencapai kondisi *curing* akhir sebelum dilakukan pengujian atau digunakan pada proses pigging.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil perbandingan, polyether merupakan material yang lebih baik dan lebih potensial untuk dikembangkan sebagai *pig foam* dibandingkan polyester karena memiliki kelenturan yang lebih baik, waktu pembentukan foam lebih cepat, memiliki nilai densitas yang lebih mendekati target, serta tidak mengalami shrinkage, sehingga lebih mampu mengikuti kontur dan perubahan geometri pipa selama proses pigging. Meskipun polyester memiliki jumlah void lebih sedikit, adanya shrinkage dan fleksibilitas yang lebih rendah menjadikannya kurang sesuai untuk kebutuhan foam pig. Selain itu hasil *cup test* pada sampel polyether menunjukkan data reaktivitas yang jauh lebih unggul dibandingkan sampel polyesther. Dimana hasil *cup test* pada polyether yaitu *cream time* selama 25 detik, *rise time* selama 75 detik, *gel time* selama 105 detik, *tack-free time* selama 120 detik, dan Free Rise Density sebesar 119,9 kg/m³. Sementara itu, polyester memiliki *cream time* 270 detik, *rise time* 310 detik, *gel time* 350 detik, *tack-free time* 410 detik, serta *Free Rise Density* 101,4 kg/m³. Polyester memiliki *void* yang lebih sedikit dan density yang lebih mendekati target 130 kg/m³, tetapi mengalami *shrinkage*. Dengan demikian, polyether dipilih sebagai material yang paling sesuai, dengan optimasi selanjutnya difokuskan pada pengurangan void dan peningkatan density tanpa mengurangi kelenturannya.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Tordal, ""Pigging of Pipelines with High Wax Content," *PPSA Presentation,* 2006.

[2] Randall, "The Polyurethanes Book," *Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.,* 2002.

[3] L. Owen, "Colloid Interface Sciene," Vols. 24, p. 114, 1967.

[4] W. Nikolov, "Colloid Interface Sciene," vol. 1, p. 113, 1989.

[5] S. F. Mysels, "Soap Films-Studies on Their Thinning and a Bibliography," *Pergamon Press,* New York, 1959.

[6] W. Malhotra, "Chemical Engineering," *Commun,* vol. 55, p. 95, (1987).

[7] D. Lee, " "Pipeline Pigging Technology: Mechanisms and Applications," *Journal of Pipeline Engineering,* vol. 12, pp. 45-60, 2015.

[8] D. Kanner, "Cell," *Plast,* vol. 5(1), p. 48, (1969).

[9] Herrington, "Flexible Polyurethane Foams, " *Dow Chemical Co,* Midland, MI, 1991.

[10] J. Fesman, "Cell," *Plast,* vol. 200, p. 1(1), 1965.

[11] F. Y. Mandraguna dan J. M. Afiff, "Pigging Pipeline," *Laporan Teknik,* 2018.

[12] ASTM, "ASTM D3574-19: Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials," *Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams,* West Conshohocken (2019).

[13] L. D. Artavia, "In Low Density Cellular Plastics," *N. C. Hilyard and A. Cunningham, Eds.,* vol. Chap. 2. , London,1994.

[14] M. D. Zhang, “Polymeric Foams,” *ACS Symposium Series 669, American Chemical Society, Washington, D.C.,* vol. Chap. 9, 1997.