ANALISIS SENSITIVITAS SPESIMEN SONASPECTION UJI LIQUID PENETRANT PADA CONTROLLED HUMIDITY CHAMBER

Elita Nawalia Agustin[1*], Ayende[1], Rangga Aditya Aulia Rahman[1]
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38, Cepu, 58315
**E-mail*: eritaagustin84@gmail.com

ABSTRAK

Liquid Penetrant Testing (LPT) merupakan salah satu metode *Non-Destructive Testing* (NDT) yang paling sering digunakan untuk mendeteksi diskontinuitas terbuka pada permukaan material. Keberhasilan metode ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya kondisi lingkungan seperti kelembapan udara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *Relative Humidity* (RH) terhadap kejelasan indikasi cacat pada pengujian LPT dengan menggunakan *Controlled Humidity Chamber*. Variasi kelembapan yang digunakan adalah 70%, 75%, 80%, 85% dan 90% dengan spesimen standar Sonaspection PL 29887 yang memiliki cacat terkalibrasi. Prosedur pengujian dilakukan sesuai ketentuan *ASME BPVC Section V Article 6* menggunakan *visible dye penetrant,* sedangkan pengamatan indikasi dilakukan selama 15 menit setelah aplikasi developer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan udara menyebabkan penurunan kualitas indikasi cacat. Pada kelembapan 70% dan 75%, cairan penetran mampu meresap sempurna dan menghasilkan indikasi visual yang tajam dengan tingkat kontras tinggi. Namun, saat kelembapan dinaikkan menjadi 80% RH, ketajaman indikasi mulai berkurang, dan pada kondisi ekstrem 85% hingga 90% RH terjadi fenomena *moisture blocking*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kelembapan tinggi mengurangi efektivitas penetrasi cairan ke dalam diskontinuitas, sehingga kualitas indikasi visual menurun. Penelitian ini menunjukkan bahwa kelembapan udara tropis penting diperhatikan teknisi NDT untuk hasil inspeksi yang optimal.

Kata kunci: ***Liquid Penetrant Testing, Non-Destructive Testing, Relative Humidity, Controlled Humidity Chamber, ASME BPVC Section V Article 6***

1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan keandalan komponen pada industri manufaktur, konstruksi, minyak dan gas, serta pembangkit tenaga sangat bergantung pada kualitas material dan sambungan las yang digunakan. Adanya cacat permukaan seperti *crack, porosity*, maupun *lack of fusion* dapat menjadi titik awal terjadinya kegagalan struktur apabila tidak terdeteksi sejak dini. Oleh karena itu, diperlukan metode inspeksi yang mampu mendeteksi diskontinuitas tanpa merusak material yang diperiksa. Salah satu metode *Non-Destructive Testing* (NDT) yang banyak digunakan adalah *Liquid Penetrant Testing* (LPT) karena mampu mendeteksi cacat permukaan pada material non pori dengan prosedur yang sederhana, cepat, serta memiliki biaya inspeksi yang relatif rendah dibandingkan beberapa metode NDT lainnya[1].

Liquid Penetrant Testing bekerja berdasarkan prinsip aksi kapiler, yaitu kemampuan cairan penetran dengan viskositas rendah untuk meresap ke dalam diskontinuitas yang terbuka pada permukaan material. Setelah proses pembersihan sisa penetran, developer akan menarik kembali cairan penetran dari dalam cacat sehingga membentuk indikasi visual yang dapat diamati oleh inspektor. Keberhasilan proses tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi permukaan, jenis penetran, *dwell time*, suhu, dan kelembapan lingkungan. Pengendalian

kelembapan ini sangat krusial untuk mencegah terjadinya *moisture blocking*, yakni suatu kondisi di mana sisa air atau uap air yang terperangkap di dalam diskontinuitas menghalangi cairan penetran untuk meresap secara optimal. Apabila salah satu parameter tersebut tidak terpenuhi, kualitas indikasi yang dihasilkan dapat menurun sehingga berpotensi menyebabkan kesalahan interpretasi hasil inspeksi[2].

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas penerapan metode LPT untuk mengevaluasi kualitas sambungan las maupun mendeteksi jenis cacat pada material logam. Namun, sebagian besar studi tersebut masih mengacu pada standar internasional yang memiliki keterbatasan regulasi atmosfer. Sebagai acuan, Standar *ASME BPVC Section V Article* 6 saat ini baru mengulas batasan suhu permukaan material secara eksplisit (10°C–52°C), tetapi belum menetapkan ambang batas ataupun aturan terkait *relative humidity.* Akibat adanya gap regulasi ini, penelitian yang secara khusus mengkaji pengaruh kelembapan udara terhadap performa cairan penetran masih sangat terbatas. Padahal, kondisi atmosfer dengan kelembapan tinggi sering dijumpai pada aktivitas inspeksi industri di wilayah beriklim tropis, yang secara fisik diduga dapat menghambat penetrasi cairan maupun pembentukan[3].

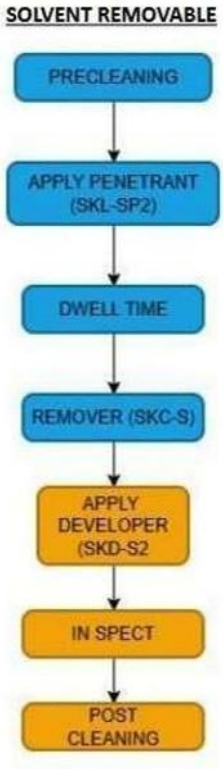
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *relative humidity* secara spesifik terhadap parameter ukur berupa kejelasan indikasi visual, optimasi *dwell time*, serta tingkat kontras yang dihasilkan pada inspeksi LPT menggunakan *Controlled Humidity Chamber* sebagai media pengondisian lingkungan. Variasi kelembapan yang digunakan meliputi 70%, 75%, 80%, 85%, dan 90% RH dengan spesimen berupa spesimen standar Sonaspection PL 29887 yang memiliki cacat terkalibrasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan data eksperimental mengenai pengaruh kelembapan terhadap kualitas indikasi cacat serta menjadi referensi dalam pelaksanaan inspeksi LPT pada lingkungan dengan tingkat kelembapan yang tinggi[4].

2. METODE

A. Liquid Penetrant Testing

Objek penelitian ini menggunakan metode *Liquid Penetrant Testing* jenis *visible dye penetrant* yang digunakan untuk mendeteksi diskontinuitas yang terbuka pada permukaan material padat non pori. Metode ini bekerja memanfaatkan prinsip aksi kapiler, yaitu kemampuan cairan penetran dengan viskositas rendah untuk meresap masuk ke dalam celah sempit atau retakan mikro pada permukaan material.

Gambar 1 menunjukkan prosedur pengujian LPT secara teknis, yang terdiri dari lima tahapan sistematis. Gambar 2 menunjukkan cairan LPT yang digunakan dalam penelitian ini.



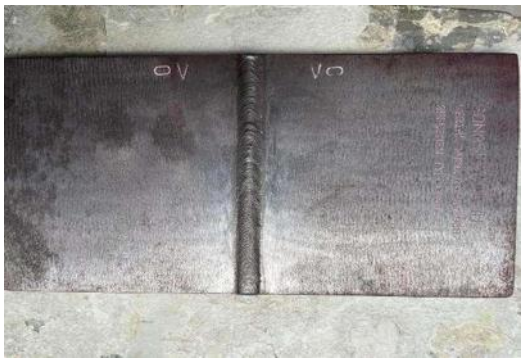
Gambar 1. Prosedur Pengaplikasian Liquid Penetrant Testing



Gambar 2. Liquid Penetrant Testing

B. Pelat Spesimen Standar Sonaspection PL 29887

Spesimen standar Sonaspection adalah spesimen uji yang dirancang khusus dengan menanamkan *flaws/defects* pada area pengelasan secara sengaja selama proses manufaktur. Cacat yang ditanamkan dibuat sedemikian rupa hingga menyerupai karakteristik cacat las asli di lapangan seperti ukuran, kedalaman, dan orientasi, namun dengan nilai dimensi yang telah terkalibrasi dan tercatat dalam sertifikat master[4].

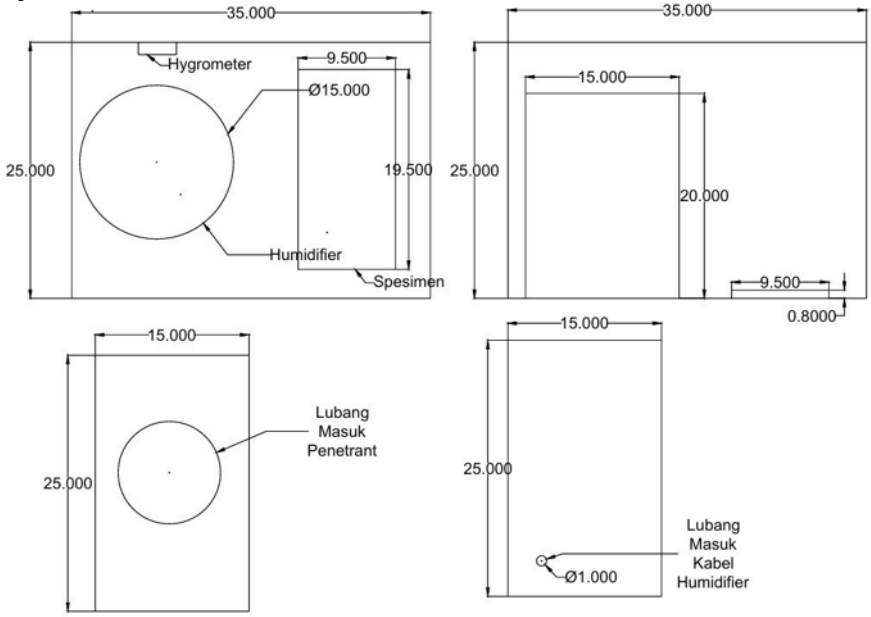


Gambar 3. Pelat Sonaspection PL 29887

Spesimen uji utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat standar Sonaspection dengan nomor seri PL 29887, yang memiliki dua jenis cacat buatan pada area sambungan las dengan posisi yang terkalibrasi dari titik acuan nol. Indikasi cacat pertama merupakan *Heat Affected Zone (HAZ) Crack*, yaitu cacat berjenis retakan sepanjang 16 mm yang terletak pada jarak 28 mm dari titik acuan dan *porosity* pada bagian *weldment.*

C. Controlled Humidity Chamber

Controlled Humidity Chamber merupakan alat bantu pengujian yang di desain untuk menciptakan dan mengontrol kondisi atmosfer di dalam ruang tertutup secara stabil dan terukur, khususnya pada parameter kelembapan udara relatif. Seperti yang terlihat, penggunaan alat ini bertujuan untuk meminimalkan pengaruh kondisi lingkungan luar yang tidak dapat dikendalikan sehingga proses pengujian dapat dilakukan secara lebih konsisten dan objektif. Selama proses pengujian, kelembapan di dalam chamber dikendalikan dengan toleransi sebesar 2% sesuai kenaikan kelembapan lingkungan secara real-time untuk memastikan keakuratan seluruh hasil uji.



Gambar 4. Sketsa Controlled Humidity Chamber



Gambar 5. Controlled Humidity Chamber

Controlled Humidity Chamber juga dilengkapi dengan beberapa komponen dan spesifikasi sebagai berikut:

Hygrometer	:	Digunakan untuk mengukur tingkat kelembapan udara.
Humidifier	:	Berfungsi untuk menyemprotkan uap dan menciptakan kelembapan.
Remote Control	:	Pengendali jarak jauh yang berfungsi untuk mengontrol, menghidupkan, mematikan Humidifier.
Access Port	:	Akses penyemprotan cairan penetran.

Spesifikasi komponen yang digunakan terdiri atas box akrilik dengan tebal 1,5 mm, humidifier berkapasitas 500 ml, *hygrometer* tipe HM6005, serta *access port* yang ditempatkan di sebelah kanan atau berlawanan arah dengan humidifier.

D. Kelembapan

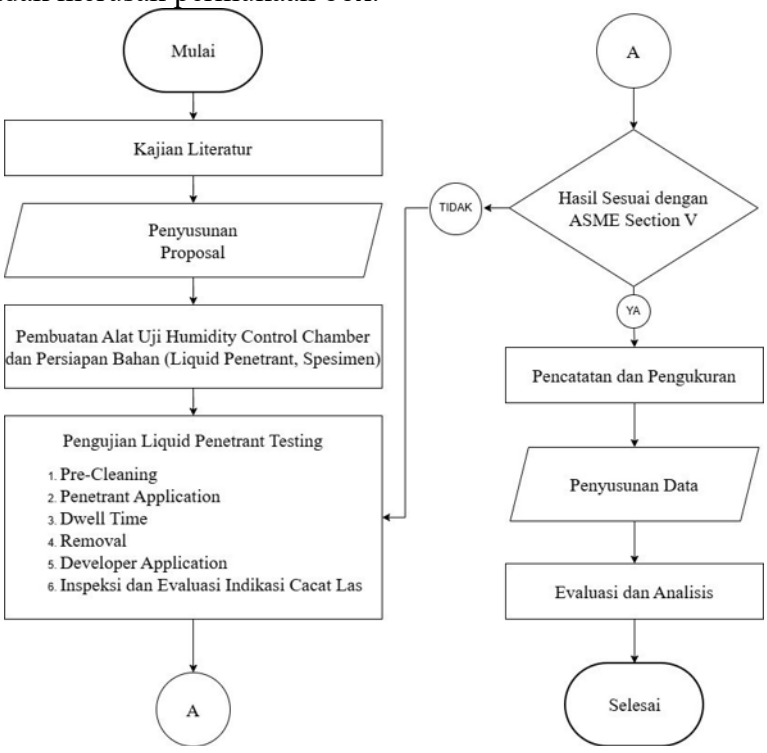
Kelembapan udara yang tinggi sangat mengganggu proses deteksi cacat las menggunakan metode LPT. Metode NDT ini bekerja berdasarkan prinsip aksi kapiler, yaitu kemampuan cairan penetran untuk meresap ke dalam celah atau diskontinuitas mikro pada permukaan material. Agar aksi kapiler ini berjalan optimal, permukaan benda kerja harus berada dalam kondisi yang benar-benar bersih, kering, dan bebas dari kontaminasi seperti minyak, debu, ataupun lapisan air. Ketika kelembapan lingkungan terlalu tinggi, uap air akan mengembun dan membentuk lapisan tipis (*kondensasi*) di atas permukaan material. Lapisan air ini bertindak sebagai penghalang fisik yang menolak atau mengencerkan cairan penetran, sehingga penetran tidak mampu mengisi seluruh rongga retakan secara sempurna. Dampak lanjutan dari kegagalan penetrasi tersebut akan terlihat pada tahap developing, di mana indikasi cacat yang muncul menjadi kabur, putus-putus, atau bahkan tidak terekam sama sekali. Kelembapan tinggi juga menurunkan tingkat kontras warna karena uap air yang terserap oleh bubuk developer dapat mengurangi daya serapnya, sehingga pola difusi penetran ke permukaan menjadi melebar atau samar. Kontras yang rendah ini menyulitkan pengamatan visual dan meningkatkan risiko kesalahan interpretasi oleh teknisi inspeksi, terutama pada cacat kritis berukuran mikro yang membutuhkan sensitivitas tinggi.

E. Prosedur Pengujian

Seluruh tahapan pengujian dilakukan sesuai prosedur yang ditentukan, agar hasil pengujian yang di dapatkan jelas dan akurat:

1. Memastikan box pengujian dalam kondisi bersih.

2. Atur posisi kamera pada atas box agar seluruh proses pengujian dapat di dokumentasikan serta diamati dengan jelas.
3. Mengatur tombol ON pada hygrometer untuk melihat kondisi kelembapan pada box.
4. Mengatur tombol ON pada remote control untuk mengatur variasi kelembapan yang dibutuhkan (70%-90% RH).
5. Tunggu hingga kelembapan yang terbaca pada hygrometer memenuhi nilai target.
6. Letakan spsimen di dalam box pengujian, pastikan box tertutup rapat.
7. Melakukan tahapan *Pre-Cleaning* dengan waktu tunggu 3 menit.
8. Selanjutnya, aplikasikan *Red Dye Penetrant* ke seluruh area specimen yang akan diuji, tunggu hingga 10 menit.
9. Lakukan pembersihan *Excess Red Dye Penetrant* menggunakan kain majun.
10. Aplikasikan *Developer* hingga bagian permukaan tertutup sempurna, pastikan untuk tidak terlalu tebal maupun terlalu tipis. Tunggu hingga 15 menit.
11. Amati hasil indikasi cacat yang muncul secara berkala
12. Catat indikasi yang muncul.
13. Lakukan secara berulang.
14. Setelah pengujian selesai, pastikan seluruh komponen pendukung sudah OFF.
15. Bersihkan sisa-sisa cairan yang tertinggal pada box menggunakan bain kering yang halus agar tidak merusak permukaan box.



Gambar 6. Flowchart Pengujian



Gambar 7. Proses Pengujian

3. PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Kelembapan 70%

Berdasarkan hasil pengujian pada tingkat kelembapan udara 70% yang ditunjukan pada gambar 8, proses *Liquid Penetrant Testing* menunjukkan performa yang paling optimal dibandingkan variasi kelembapan lainnya. Pada kondisi lingkungan tersebut, kandungan uap air belum terlalu tinggi sehingga tidak membentuk lapisan kelembapan berlebih pada permukaan spesimen, yang membuat cairan penetran dapat bekerja secara efektif melalui prinsip aksi kapiler tanpa hambatan signifikan. Indikasi cacat las seperti *crack* dan *porosity* tampak sangat jelas, tegas, dan berkontras tinggi. Secara spesifik, *dwell time* selama 6 menit dengan waktu pengujian total 15 menit terbukti memberikan durasi yang paling ideal bagi cairan penetran untuk meresap secara sempurna ke dalam celah diskontinuitas kecil. Temuan ini menegaskan bahwa faktor kelembapan udara dan waktu penetrasi memegang peranan krusial yang saling memengaruhi terhadap tingkat kejelasan visual dan kemudahan interpretasi hasil inspeksi di lapangan.



Gambar 8. Hasil Pengujian Kelembapan 70%

B. Hasil Pengujian Kelembapan 75%

Berdasarkan pengujian pada kondisi kelembapan udara 75% yang ditunjukan pada gambar 9 , hasil *Liquid Penetrant Testing* menunjukkan bahwa indikasi cacat permukaan mulai terlihat jelas setelah waktu penetrasi mencapai 9 menit dengan total waktu pengujian 15 menit. Dibandingkan kondisi yang lebih kering, peningkatan kadar uap air di udara mulai memengaruhi sensitivitas pengujian dan sedikit menurunkan efektivitas aksi kapiler cairan penetran, sehingga proses penetrasi ke dalam celah diskontinuitas berlangsung lebih lambat dan memerlukan waktu tunggu yang lebih lama. Meskipun pada menit-menit awal indikasi tampak samar, cairan penetran masih dapat bekerja secara efektif untuk menghasilkan pola kontras yang tegas setelah mencapai durasi 9 menit. Temuan ini menegaskan adanya korelasi langsung antara tingkat kelembapan udara dan kebutuhan waktu optimal, di mana kenaikan kelembapan menuntut penyesuaian durasi penetrasi agar visualisasi cacat tetap akurat.



Gambar 9. Hasil Pengujian Kelembapan 75%

C. Hasil Pengujian Kelembapan 80%

Berdasarkan pengujian pada kondisi kelembapan udara 80% yang ditunjukan pada gambar 10, hasil *Liquid Penetrant Testing* menunjukkan bahwa indikasi cacat mulai terlihat dengan cukup jelas setelah waktu penetrasi mencapai 11 menit dengan total waktu pengujian 15 menit. Peningkatan kadar uap air di udara berdampak pada penurunan kecepatan aksi kapiler dan sensitivitas cairan penetran, sehingga pada menit-menit awal indikasi tampak samar dengan kontras warna yang belum optimal. Meskipun demikian, dengan memberikan waktu tunggu yang lebih lama hingga 11 menit, cairan penetran tetap mampu meresap secara efektif ke dalam celah diskontinuitas permukaan dan menghasilkan visualisasi cacat yang stabil serta tegas setelah aplikasi developer. Temuan ini mengonfirmasi bahwa tingginya kelembapan menuntut penyesuaian durasi penetrasi agar hasil inspeksi tetap akurat dan mudah diinterpretasikan.



Gambar 10. Hasil Pengujian Kelembapan 80%

D. Hasil Pengujian Kelembapan 85%

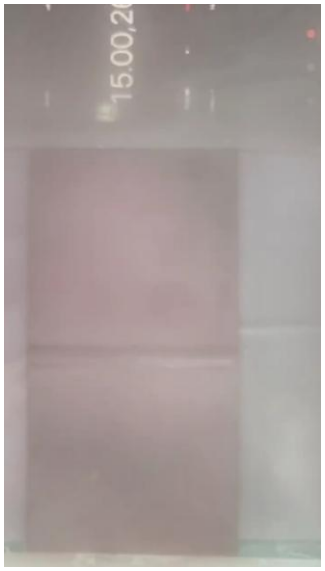
Berdasarkan pengujian pada kondisi kelembapan udara 85% yang ditunjukan pada gambar 11 , secara nyata mulai merusak sensitivitas hasil *interpretasi.* Berdasarkan data pengamatan, pada kondisi 85%, lapisan uap air mikroskopis mulai memicu *moisture blocking* yang menghambat aksi kapiler cairan penetran, sehingga pada menit ke-15 indikasi cacat sudah tampak samar dan kontras warnanya melemah. Akibatnya, pada menit-menit awal hingga batas pengujian 15 menit, kontras warna indikasi tidak cukup jelas, pola yang terbentuk tidak tegas, dan visualisasi cacat menjadi sangat terbatas. Temuan ini menegaskan bahwa kelembapan 85% sangat memengaruhi sensitivitas pengujian, di mana durasi konvensional tidak lagi memadai untuk menghasilkan indikasi cacat yang andal tanpa penyesuaian waktu penetrasi yang lebih panjang.



Gambar 11. Hasil Pengujian Kelembapan 85%

E. Hasil Pengujian Kelembapan 90%

Berdasarkan pengujian pada kondisi kelembapan udara 90% yang ditunjukan pada gambar 12, mulai menurunkan sensitivitas hasil *interpretasi* yang menyebabkan kegagalan pembacaan secara total. Tingginya kandungan uap air membentuk lapisan kelembapan mikroskopis (moisture blocking) pada permukaan spesimen yang menolak aksi kapiler cairan penetran secara fisik, sehingga cairan kesulitan meresap optimal ke dalam celah diskontinuitas. Akibatnya, setelah aplikasi developer, indikasi cacat tampak sangat samar, kontras warna lemah, tidak stabil, serta hilang total atau sulit dibedakan dari material di sekitarnya meskipun waktu penetrasi telah mencapai 15 menit. Temuan ini menegaskan bahwa kelembapan 90% sudah berada pada kondisi yang tidak ideal dan menurunkan sensitivitas metode secara signifikan, yang berisiko tinggi memicu kesalahan interpretasi atau kegagalan deteksi cacat sehingga pengendalian kondisi lingkungan pengujian mutlak diperlukan.



Gambar 12. Hasil Pengujian Kelembapan 90%

F. Analisis Hasil Pengujian Berdasarkan Standar ASME Section V Article 6

Berdasarkan *Standar ASME BPVC Section V Article 6* bagian T-672 dan T-676*, dwell time* dan interpretation time ditetapkan sebagai parameter kritis untuk memastikan cairan penetran dapat meresap dan memvisualisasikan cacat material secara optimal. Regulasi ini secara eksplisit mengatur waktu tunggu antara 5 hingga 120 menit serta waktu pembacaan pada rentang 10 hingga 60 menit, dengan variabel lingkungan yang saat ini baru berfokus pada batasan suhu permukaan material (T-652). Meskipun demikian, standar *ASME* tersebut belum merumuskan regulasi atau batasan spesifik terkait *relative humidity* selama proses pengujian.
Hasil eksperimen pada penelitian ini menunjukkan adanya celah regulasi tersebut. Pengujian pada spesimen menunjukkan bahwa tingkat kelembapan udara yang tinggi (85%–90%) memicu fenomena *moisture blocking.* Dalam kondisi atmosfer tersebut, embun mikro atau uap air menempati rongga diskontinuitas material terlebih dahulu sebelum cairan penetran berpenetrasi, sehingga menghambat aksi kapiler secara fisik. Akibatnya, meskipun kepatuhan terhadap parameter *dwell time* dan *interpretation time* telah diaplikasikan secara ketat sesuai prosedur *ASME*, visualisasi indikasi cacat tetap mengalami kendala dan penurunan akurasi. Korelasi ini membuktikan bahwa parameter waktu yang diatur oleh *ASME* tidak dapat berdiri sendiri tanpa adanya kontrol atmosfer yang memadai. Oleh karena itu, temuan ini mengusulkan urgensi penambahan spesifikasi batasan kelembapan relatif ideal ke dalam parameter

operasional standar, guna melengkapi regulasi suhu dan waktu yang sudah ada demi menjamin validitas inspeksi di lapangan.

Table T-672
Minimum Dwell Times

(23)

Material	Form	Type of Discontinuity	Dwell Times [Note (1)], (minutes) Penetrant
Aluminum, magnesium, steel, brass and bronze, titanium and high-temperature alloys	Welds, heat-affected zones, and castings	Porosity, lack of fusion, cracks (all forms), cold shuts	5
	Wrought materials — extrusions, forgings, plate	Laps, cracks	10
Carbide-tipped tools	Brazed or welded	Lack of fusion, porosity, cracks	5
Plastic	All forms	Cracks	5
Glass	All forms	Cracks	5
Ceramic	All forms	Cracks	5

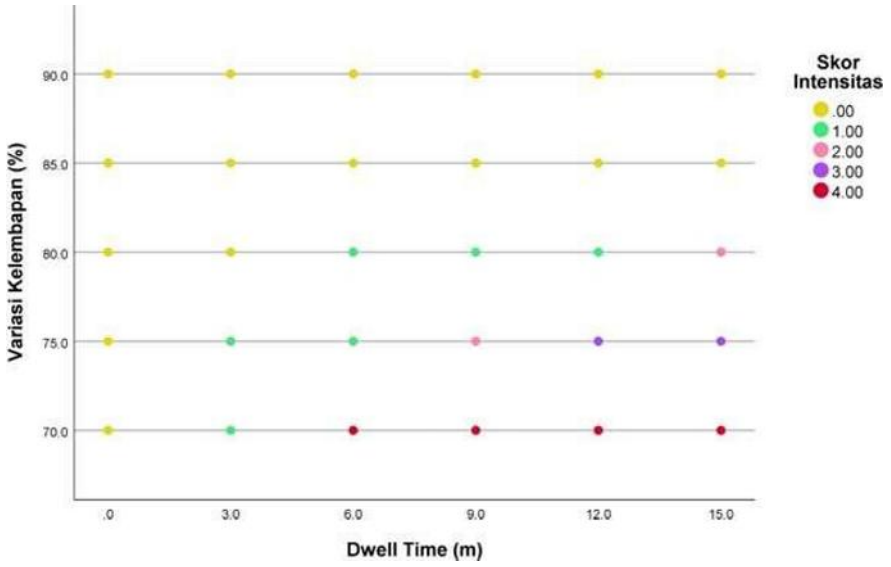
NOTE:
(1) For temperature range from 50°F to 125°F (10°C to 52°C). For temperatures from 40°F (5°C) up to 50°F (10°C), minimum penetrant dwell time shall be 2 times the value listed.

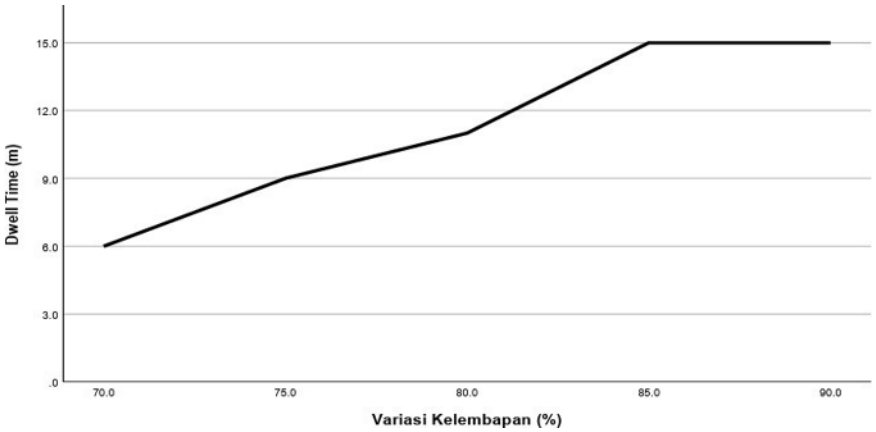
Gambar 12. ASME Section V Article 6, T.672.1 *Minimun Dwell time*

T-676 INTERPRETATION

T-676.1 Final Interpretation. Final interpretation shall be made not less than 10 min nor more than 60 min after the requirements of T-675.3 are satisfied, unless otherwise qualified under T-653. If bleed-out does not alter the examination results, longer periods are permitted. If the surface to be examined is large enough to preclude complete examination within the prescribed or established time, the examination shall be performed in increments.

Gambar 13. ASME Section V Article 6, T.676.1 *Final Interpretation*





Gambar 13. Grafik Hasil Pengujian Variasi Kelembapan 70%-90% RH

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pengaruh kelembapan terhadap pengujian *Liquid Penetrant Testing* , diperoleh simpulan sebagai berikut:

1. Metode LPT terbukti efektif untuk mendeteksi diskontinuitas terbuka pada permukaan sambungan las, dengan ambang batas kelembapan kritis di mana kelembapan >80% RH mulai menurunkan sensitivitas pengujian, dan kelembapan 90% RH menyebabkan kegagalan pembacaan secara total.
2. Fenomena moisture blocking menyebabkan penurunan efektivitas pengujian karena kondensasi embun mikro menyumbat rongga cacat lebih awal, sehingga aksi kapiler cairan penetran tertolak secara fisik.
3. Celah Regulasi menunjukkan bahwa kepatuhan formal terhadap waktu ASME Section V tidak cukup karena belum memasukkan batasan kuantitatif kelembapan udara (RH) sebagai parameter wajib di iklim tropis.
4. Penelitian ini memiliki keterbatasan, di antaranya hanya menggunakan satu jenis penetran dan berfokus pada kondisi lingkungan spesifik, yang dapat dijadikan pijakan untuk riset selanjutnya.

Sebagai rekomendasi untuk mengatasi celah regulasi tersebut, batasan kelembapan relatif maksimum yang aman, yaitu di bawah 80% RH perlu dimasukkan ke dalam SOP lapangan berdampingan dengan parameter suhu permukaan. Untuk pengujian pada area dengan kelembapan di atas 80% RH, teknisi wajib melakukan pengeringan tambahan menggunakan pemanasan ringan (*pre-heating*) atau penyemprotan udara kering *(air-blowing*) setelah pembersihan awal. Selain itu, perlu dilakukan pengujian lanjutan menggunakan berbagai merek atau tipe cairan penetran dengan variasi viskositas dan sifat hidrofobik untuk mengidentifikasi karakteristik cairan yang lebih tahan terhadap hambatan air di lingkungan basah.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] P. V. Code, “Section v 2023,” 2023.
[2] A. Aqthobirrobbany, F. Rahmasari, and I. Purnamansyah, “ANALISIS SUHU DAN WAKTU TUNGGU CAIRAN PENETRANT DALAM PROSES NDT PADA RIB A320,” vol. 5, no. 4, pp. 995–1008, 2025, doi: 10.53866/jimi.v5i4.955.

[3] B. Yunianto and P. Wicaksana, "Analisis Cacat Hasil Pengelasan Pada Pipa ASTM A106 Grade B Menggunakan Magnetic Particle Test dan Liquid Penetrant Test di Workshop Las dan Inspeksi PPSDM Migas Cepu," vol. 25, no. 2, pp. 54–60, 2023.
[4] M. R. Al Faiq, S. Hastuti, and N. Mulyaningsih, "Defect analysis of butt joint type SMAW welding connection of SS400 steel material using liquid penetrant and ultrasonic test methods," vol. 7, no. 1, pp. 4–8, 2025.
[5] S. Practice, "Standard Practice for Liquid Penetrant Testing 1," pp. 1–12, doi: 10.1520/E1417.
[6] I. F. Efriandi, "Analysis of Penetrant Test Results of S355J2 Steel Welding Connections for Qualification Welding," vol. 4, no. 1, pp. 41–48, 2023.
[7] P. Yudhistira, I. Prabowo, and Y. Yunardi, "Study of the Effect of Penetrant Temperature Variations on Corrosion Sensitivity of 7075 Alumnium material using the Liquid Penetrant Test Method at PT . Dirgantara Indonesia (IAe)," vol. 5, no. 2, pp. 209–217, 2025.
[8] T. Sipil, F. Teknik, and U. Muhammadiyah, "penetrant test," 2024.
[9] "Kajian liquid penetrant test (pt) dalam," vol. 11, 2026.
[10] K. A. Maqbulah, T. Author, T. Mesin, F. Teknik, U. M. Malang, and J. Timur, "Analisa Hasil Pengelasan pada Lambung Kapal dengan Metode Penetrant Test," vol. 3, no. 1, pp. 182–190, 2024.