

Pengaruh Tingkat Pemadatan (*Under-Compaction* & *Over-Compaction*) Terhadap Porositas, *Bleeding*, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³, Sumirin⁴
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia^{1,2,3}

Corresponding Author: iamunknownpeople@gmail.com

Info Artikel

Submitted: 30 Juli 2026

Revised : 23 Agustus 2026

Accepted: 26 September 2026

Published: 02 Oktober 2026

Keywords: *Bleeding*;
Compressive Strength; *Over-Compaction*; *Compaction*;
Porosity; *Under-Compaction*.

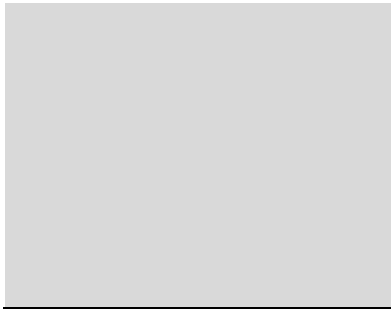
Kata Kunci: *Bleeding*; *Kuat Tekan*; *Over-Compaction*;
Pemadatan; *Porositas*; *Under-Compaction*.

Abstract

Compaction is one of the most critical stages in Concrete Construction, as it significantly influences the quality of both Fresh and Hardened Concrete. Insufficient compaction (Under-Compaction) may increase Porosity due to the formation of entrapped Air Voids, whereas excessive compaction (Over-Compaction) may induce Bleeding through the separation of water from Fresh Concrete. This study aims to investigate the effect of Compaction Level on the Bleeding, Porosity, and Compressive Strength of Normal Concrete with a design Compressive Strength of 30 MPa. An experimental laboratory programme was conducted using Cylindrical Concrete Specimens measuring 150 × 300 mm. The Compaction Levels were varied by applying 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 Rodding strokes. The testing programme comprised the Slump Test in accordance with SNI 1972:2022, the Bleeding Test based on ASTM C232/C232M, the Porosity Test following the principles of ASTM C1754, and the Compressive Strength Test in accordance with SNI 1974:2011 and ASTM C39/C39M. The results indicate that Under-Compaction increased Porosity to 10.7% and reduced the Compressive Strength of Concrete, whereas Over-Compaction increased the tendency for Bleeding, reaching 0.241%. The Optimum Compaction condition provided the best balance between Porosity, Bleeding, and Compressive Strength. Overall, the level of compaction significantly affected the properties of both Fresh and Hardened Concrete, demonstrating that proper compaction control is essential for achieving Optimum Concrete performance.

Abstrak

Proses pemadatan merupakan salah satu tahapan penting dalam pekerjaan beton karena berpengaruh terhadap kualitas Beton Segar maupun Beton Keras. Pemadatan yang kurang (*Under-Compaction*) dapat meningkatkan Porositas akibat terbentuknya rongga udara, sedangkan pemadatan berlebih (*Over-Compaction*) berpotensi menimbulkan *Bleeding* akibat pemisahan air dari campuran Beton Segar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh Tingkat Pemadatan terhadap *Bleeding*, Porositas, dan Kuat Tekan Beton Normal Mutu Rencana f'_c 30 MPa. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium menggunakan Benda Uji Silinder berukuran 150 × 300 mm. Variasi tingkat pemadatan dilakukan dengan jumlah tumbukan 10, 15, 20, 25, 30, 35, dan 40 kali. Pengujian meliputi *Slump Test* berdasarkan SNI 1972:2022, *Bleeding Test* berdasarkan ASTM C232/C232M, Pengujian Porositas berdasarkan pendekatan ASTM C1754, serta Pengujian Kuat Tekan berdasarkan SNI 1974:2011 dan ASTM C39/C39M. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Under-Compaction* meningkatkan Porositas hingga 10,7% dan menurunkan Kuat Tekan Beton, sedangkan *Over-Compaction* meningkatkan kecenderungan terjadinya *Bleeding* hingga 0,241%. Kondisi pemadatan normal menghasilkan



keseimbangan terbaik antara Porositas, *Bleeding*, dan Kuat Tekan. Secara keseluruhan, tingkat pemadatan berpengaruh terhadap karakteristik Beton Segar dan Beton Keras sehingga pengendalian proses pemadatan menjadi faktor penting dalam memperoleh Mutu Beton yang optimal.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Publisher: Lembaga Penerbit Penelitian Nusantara

Pendahuluan

Beton merupakan Material Konstruksi yang paling banyak digunakan dalam Pembangunan Infrastruktur karena memiliki Kuat Tekan yang tinggi, kemudahan dalam pelaksanaan, serta ketersediaan material penyusunnya yang melimpah. Beton tersusun atas campuran Semen, Agregat Halus, Agregat Kasar, dan Air yang membentuk suatu Material Komposit, dimana Sifat Mekaniknya sangat dipengaruhi oleh struktur internalnya (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Salah satu faktor penting yang menentukan kualitas Struktur Internal Beton adalah Tingkat Kepadatan (*Density*) yang berkaitan langsung dengan keberadaan rongga atau pori di dalam Beton. Porositas Beton didefinisikan sebagai perbandingan Volume Rongga terhadap Volume Total Beton, yang dapat berupa Pori Kapiler maupun Rongga Udara terperangkap akibat proses pemadatan yang tidak sempurna.

Neville (2011) menyatakan bahwa peningkatan Porositas akan mengurangi Luas Efektif Penampang beton dalam menahan beban tekan, sehingga menyebabkan penurunan kuat tekan secara signifikan. Lebih lanjut dinyatakan bahwa “*the compressive strength of concrete is primarily governed by its porosity and the continuity of its solid skeleton.*” (Neville, 2011).

Hubungan antara Porositas dan Kuat Tekan Beton juga didukung oleh berbagai Penelitian Ilmiah. Dalam Studi Eksperimental yang dipublikasikan pada Jurnal *Cement and Concrete Research*, ditemukan bahwa peningkatan Volume Pori dalam Beton secara langsung menurunkan Kekuatan Mekanik akibat berkurangnya konektivitas struktur padat (Mindess et al., 2003).

Sejalan dengan itu, Mehta dan Monteiro (2014) menyatakan bahwa “*the strength and durability of concrete are inversely related to its porosity and permeability; the denser the concrete, the higher its resistance to deterioration.*” Pernyataan tersebut menegaskan bahwa Beton dengan struktur yang lebih padat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban maupun lingkungan agresif.

Selain menurunkan Kekuatan Mekanik, Porositas juga mempercepat Kerusakan Kimiawi dan Fisik Beton. Safiuddin, et al. (2018) menyatakan bahwa peningkatan Porositas sebesar 5% dapat menurunkan Kuat Tekan hingga 15–20%, karena Pori-Pori berfungsi sebagai Jalur Difusi air dan udara yang memperlemah Ikatan Pasta Semen. Kondisi ini menunjukkan betapa pentingnya memahami hubungan antara Pengeroposan (Porositas) dan Kekuatan Material Beton untuk menjamin keawetan Struktur Jangka Panjang.

Dalam konteks penelitian di Indonesia, hubungan antara Porositas dan Kuat Tekan juga telah dibuktikan secara Empiris. Penelitian oleh Tilik dan Sulianti (2012) menunjukkan bahwa Beton dengan Tingkat Kepadatan yang lebih rendah akibat pemadatan yang kurang optimal memiliki Kuat Tekan yang lebih kecil dibandingkan Beton yang dipadatkan sesuai standar. Penelitian lain yang dipublikasikan dalam Jurnal Teknik Sipil Nasional juga menunjukkan bahwa peningkatan Porositas berbanding terbalik dengan Kuat Tekan Beton, dimana rongga-rongga internal berperan sebagai titik awal terjadinya retak (*Crack Initiation*) pada Beton.

Selain Pengeroposan, Proses Pemadatan Beton yang tidak tepat juga dapat menimbulkan fenomena lain pada Beton Segar, yaitu *Bleeding*. *Bleeding* merupakan peristiwa naiknya air ke permukaan beton akibat perbedaan Berat Jenis antara Partikel Padat dan Air dalam campuran. Pada kondisi tertentu, terutama akibat Pemadatan Berlebih (*Over-Compaction*), air dapat terakumulasi di dalam beton dan membentuk Rongga Internal yang melemahkan ikatan antara Pasta Semen dan Agregat (Kosmatka et al., 2016). Fenomena ini tidak hanya mempengaruhi Homogenitas Beton, tetapi juga berpotensi menurunkan Kekuatan Mekanik dan meningkatkan Permeabilitas Beton.

Selain mempengaruhi homogenitas campuran, *Bleeding* juga berdampak langsung terhadap penurunan kualitas Mekanik Beton. *Bleeding* yang berlebihan menyebabkan terbentuknya lapisan air di dalam beton yang meningkatkan Rasio Air-Semen lokal serta menghasilkan zona lemah pada struktur beton.

Mehta dan Monteiro (2014) menyatakan bahwa peningkatan *Bleeding* berkontribusi terhadap meningkatnya Porositas efektif dan penurunan Kekuatan Beton. Dalam studi eksperimental, Beton dengan tingkat *Bleeding* tinggi dilaporkan mengalami penurunan Kuat Tekan hingga sekitar 10–15%, akibat melemahnya ikatan antara Pasta Semen dan Agregat serta meningkatnya Permeabilitas Beton (Kosmatka et al., 2016). Kondisi ini menunjukkan bahwa *Bleeding* berperan sebagai faktor kritis yang tidak hanya mempengaruhi kualitas Beton Segar, tetapi juga menentukan Kinerja Mekanik dan Durabilitas Beton dalam jangka panjang.

Pemadatan Beton sendiri merupakan salah satu tahapan paling krusial dalam pekerjaan Beton, karena secara langsung menentukan Tingkat Kepadatan dan Distribusi Rongga dalam Beton. Pemadatan yang tidak memadai (*Under-Compaction*) akan menyebabkan udara terperangkap di dalam Beton, sedangkan pemadatan yang berlebihan dapat menyebabkan Segregasi dan *Bleeding*. Mehta dan Monteiro (2014) menegaskan bahwa “*inadequate compaction may lead to a reduction in compressive strength even when the mix proportions are properly designed.*”

Dalam praktik konstruksi di lapangan, Tingkat Pemadatan Beton sering terjadi akibat keterbatasan teknis, seperti kepadatan tulangan, keterbatasan alat, maupun faktor tenaga kerja. Kondisi ini menyebabkan Beton yang dihasilkan memiliki kualitas yang tidak seragam meskipun komposisi campuran telah dirancang sesuai standar. Dengan demikian, kesalahan dalam proses pemadatan dapat menjadi faktor dominan yang mempengaruhi kualitas akhir Beton.

Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada variasi material, seperti perubahan Rasio Air-Semen (*Water-Cement Ratio*), penggunaan bahan tambah (*Admixture*), maupun pengembangan Beton khusus.

Namun demikian, penelitian yang secara spesifik mengkaji pengaruh Tingkat Pemadatan (*Under-Compaction dan Over-Compaction*) terhadap terbentuknya Porositas dan *Bleeding* serta dampaknya terhadap Kuat Tekan Beton normal masih relatif terbatas, khususnya secara simultan dan/atau sekaligus dalam konteks Penelitian Eksperimental di Indonesia.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat diidentifikasi adanya Kesenjangan Penelitian (*Research Gap*) terkait belum banyaknya kajian yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh Tingkat Pemadatan terhadap kualitas Mikrostruktur dan Sifat Mekanik Beton. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh tingkat pemadatan terhadap terbentuknya Pengeroposan (Porositas) dan *Bleeding* serta dampaknya terhadap Kuat Tekan Beton.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan

Pengaruh Tingkat Pemadatan (*Under-Compaction* & *Over-Compaction*) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin ¹, Sholahuddin Azhar Widagdo ², Prabowo Setyawan ³

kuantitatif untuk mengetahui pengaruh tingkat pemadatan beton terhadap karakteristik beton segar dan beton keras. Variasi pemadatan meliputi *Under-Compaction*, *Normal/Optimal-Compaction*, dan *Over-Compaction*, sedangkan parameter yang diamati adalah *Slump*, *Bleeding*, Porositas, dan Kuat Tekan Beton. Penelitian bertujuan memberikan gambaran mengenai pengaruh pemadatan yang kurang maupun berlebih terhadap mutu beton, khususnya pada beton normal dengan mutu rencana $f_c' 30$ MPa.

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknologi dan Bahan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) Semarang, dengan waktu pelaksanaan sekitar Mei sampai Juli 2026. Laboratorium dipilih karena memiliki fasilitas yang mendukung seluruh tahapan penelitian, mulai dari pemeriksaan material, pencampuran beton, pembuatan benda uji, *curing*, hingga pengujian beton segar dan beton keras. Peralatan utama yang digunakan meliputi *concrete mixer*, timbangan, ayakan, piknometer, cetakan silinder, *tamping rod*, *slump cone*, *Compression Testing Machine*, *curing tank*, oven, serta berbagai alat ukur dan perlengkapan pendukung.

Bahan penelitian terdiri atas Portland Composite Cement (PCC), agregat halus berupa pasir alam Muntilan, agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm, dan air dari Laboratorium Teknologi dan Bahan Konstruksi UNISSULA. Tidak digunakan bahan tambah kimia maupun mineral agar pengaruh variasi pemadatan dapat diamati secara lebih jelas. Sebelum digunakan, material diperiksa karakteristiknya, meliputi analisis gradasi, berat jenis, penyerapan air, kadar air, kadar lumpur, dan berat isi agregat. Perencanaan campuran menggunakan acuan SNI 7656:2012 dan ACI 211.1 dengan beton normal $f_c' 30$ MPa, FAS sekitar 0,45, serta benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm.

Prosedur penelitian dilakukan secara bertahap, dimulai dari pemeriksaan material, *mix design*, pembuatan benda uji, pemberian variasi pemadatan, pengujian beton segar, *curing*, pengujian beton keras, hingga pengolahan dan analisis data. Variasi jumlah tumbukan terdiri atas 10, 15, dan 20 tumbukan untuk *Under-Compaction*, 25 tumbukan untuk *Normal Compaction*, serta 30, 35, dan 40 tumbukan untuk *Over-Compaction*. Beton dimasukkan ke dalam cetakan silinder sebanyak tiga lapis dan setiap lapisan dipadatkan sesuai variasi jumlah tumbukan. Setelah didiamkan sekitar 24 jam, benda uji dilepas dari cetakan dan menjalani proses *curing* hingga umur pengujian 7 hari.

Pengujian beton segar meliputi *Slump Test* dan pengamatan *Bleeding*. *Slump Test* digunakan sebagai parameter kontrol untuk memastikan *workability* dan konsistensi campuran relatif seragam sebelum dilakukan pemadatan. Pengamatan *Bleeding* difokuskan pada variasi *Over-Compaction* OC-30, OC-35, dan OC-40 dengan mengukur air yang naik ke permukaan beton menggunakan gelas ukur. Semakin besar *Bleeding* menunjukkan semakin tidak stabilnya campuran akibat energi pemadatan yang berlebihan dan dapat berkaitan dengan segregasi. Sementara itu, pengujian beton keras meliputi Porositas dan Kuat Tekan; pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari menggunakan tiga benda uji untuk setiap variasi. Pengumpulan data dilakukan secara eksperimental melalui observasi langsung, pengukuran laboratorium, pencatatan, dan dokumentasi. Data primer meliputi hasil *Slump*, *Bleeding*, Porositas, Kuat Tekan Beton umur 7 hari, serta dokumentasi proses pencampuran, pemadatan, *curing*, dan pengujian. Data sekunder diperoleh dari buku, jurnal, serta standar SNI, ASTM, dan ACI yang digunakan sebagai dasar teori, acuan pengujian, pembandingan, dan pendukung interpretasi hasil. Untuk menjaga validitas dan keandalan data, digunakan material homogen, alat yang terkalibrasi, pengendalian FAS, konsistensi metode pemadatan, serta pengawasan selama proses *curing* dan pengujian.

Pengolahan dan analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif melalui tabel, grafik, perhitungan rata-rata, persentase perubahan, dan deviasi standar untuk membandingkan setiap variasi pemadatan. *Bleeding* dianalisis pada variasi *Over-Compaction*, sedangkan

Porositas dianalisis pada variasi *Under-Compaction* untuk melihat terbentuknya rongga akibat kurangnya energi pemadatan. Selanjutnya hasil Kuat Tekan dibandingkan antara kondisi *Under-Compaction*, *Normal-Compaction*, dan *Over-Compaction* untuk mengetahui perubahan mutu beton dan menentukan tingkat pemadatan yang paling optimum. Analisis juga diarahkan untuk melihat hubungan antara Porositas, *Bleeding*, dan Kuat Tekan sehingga dapat diketahui dampak pemadatan kurang maupun berlebih terhadap kualitas beton f_c' 30 MPa.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Analisis Hasil Penelitian

Subbab ini menyajikan analisis mengenai hubungan kausalitas antarvariabel yang diteliti, yaitu tingkat pemadatan (*Under-Compaction*, *Normal-Compaction*, dan *Over-Compaction*), *Bleeding*, Porositas, dan Kuat Tekan Beton. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang diinterpretasikan dengan mengacu pada teori-teori teknologi beton, mekanisme perilaku Beton Segar dan Beton Keras, jurnal klasik dan hasil penelitian terdahulu, serta standar pengujian yang berlaku, seperti SNI dan ASTM. Pembahasan difokuskan pada mekanisme pengaruh variasi tingkat pemadatan terhadap perubahan struktur internal beton, pembentukan *Bleeding* dan Porositas, serta implikasinya terhadap perkembangan Kuat Tekan Beton. Selain itu, analisis juga mengkaji hubungan antarvariabel secara terpadu untuk menjelaskan pola perubahan yang terjadi pada setiap variasi tingkat pemadatan, termasuk memberikan justifikasi ilmiah terhadap hasil-hasil yang menunjukkan kecenderungan berbeda (*outlier*) berdasarkan teori dan literatur yang relevan.

Pengaruh Tingkat Pemadatan Terhadap *Bleeding*

Bleeding merupakan fenomena terpisahnya air pencampur (*free water*) dari adukan Beton Segar yang bergerak naik ke permukaan akibat proses Sedimentasi material padat. Tingkat pemadatan memegang peranan krusial dalam menjaga stabilitas campuran, di mana energi mekanis yang diberikan harus cukup untuk merapatkan agregat tanpa memicu ketidakseimbangan susunan matriks. Menurut ACI *Committee* 309 (2005), laju konsolidasi dan stabilitas Beton Segar berbanding lurus dengan besarnya energi kinetik yang ditransfer selama proses pemadatan berlangsung.

Berdasarkan hasil pengujian, korelasi antara tingkat pemadatan dan fenomena *Bleeding* menunjukkan pola ambang batas (*threshold effect*) yang sangat jelas. Pada fase *Under-Compaction* hingga pemadatan standar (UC-10, UC-15, UC-20, dan NC-25), sama sekali tidak terdeteksi adanya air yang terpisah ke permukaan (*volume Bleeding* 0,00%). Ketiadaan *Bleeding* pada rentang pemadatan ini disebabkan oleh dominasi rongga udara terperangkap (*entrapped air voids*) yang masih tersebar di dalam struktur adukan. Hal ini sejalan dengan studi klasik Powers (1939) yang menegaskan bahwa air bebas hanya akan terdesak ke permukaan apabila jaringan kapiler dan ruang interpartikel telah terisi penuh (*saturated packing state*). Bahkan pada kondisi optimum (NC-25), seluruh volume air terikat dengan baik di antara celah agregat dan mulai terakomodasi dalam reaksi hidrasi awal semen tanpa adanya tekanan hidrostatik berlebih (Neville, 2011).

Fenomena *Bleeding* baru mulai terdeteksi secara konsisten ketika energi mekanis melewati batas optimum, yaitu pada kondisi *Over-Compaction*. Persentase *Bleeding* mengalami peningkatan secara linier seiring dengan penambahan jumlah tumbukan; terukur sebesar 0,09% pada OC-30, meningkat menjadi 0,16% pada OC-35, dan mencapai titik puncaknya sebesar 0,24% pada OC-40. Peningkatan ini secara empiris membuktikan bahwa tumbukan berlebih merusak kohesivitas internal campuran Beton Segar.

Secara mekanis, terjadinya *Bleeding* pada fase pemadatan berlebih dijelaskan melalui

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³

prinsip konsolidasi spesifik (*settlement and hydrostatic displacement*). Menurut Mindess et al. (2003), energi tumbukan yang terus-menerus diberikan pada adukan yang sudah padat akan memaksa partikel agregat kasar, yang memiliki massa jenis (*density*) lebih besar, untuk mengendap secara paksa ke dasar cetakan (*sedimentation*). Proses pengendapan ini memperkecil volume ruang pori antarpartikel secara drastis, sehingga mendesak air bebas yang bermassa jenis lebih rendah untuk mencari jalan keluar dengan bergerak ke atas melalui saluran kapiler (*Bleeding channels*). Pemisahan fase (*phase separation*) inilah yang kemudian terukur sebagai *Bleeding* pada permukaan sampel.

Meskipun tren volume air yang terpisah terus meningkat pada rentang OC-30 hingga OC-40, nilai maksimal yang diperoleh (0,24%) masih berada jauh di bawah ambang batas kritis keparahan. Berdasarkan standar pengujian ASTM C232, persentase di bawah 0,5% diklasifikasikan sebagai *Bleeding* yang sangat rendah (*negligible Bleeding*). Kondisi ini memberikan justifikasi bahwa campuran beton segar dalam penelitian ini secara inheren memiliki stabilitas yang sangat baik. Stabilitas ini utamanya disokong oleh penggunaan Faktor Air-Semen (FAS) yang rendah (0,45) tanpa penambahan *admixture*, yang menghasilkan konsistensi beton yang relatif kaku (*Slump* 7,5 cm) sehingga secara alami mampu menahan laju pergerakan air berlebih.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa pemadatan berlebih (*Over-Compaction*) berpengaruh langsung terhadap munculnya *Bleeding* pada Beton Segar akibat terjadinya sedimentasi material padat. Namun, dampak destruktif dari fenomena *Bleeding* ini berhasil diredam secara signifikan oleh desain proporsi campuran yang menggunakan FAS rendah, sehingga stabilitas matriks beton tetap terjaga dan tidak menimbulkan efek kerugian masif pada fase Beton Segar.

Pengaruh Tingkat Pemadatan Terhadap Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter utama yang menggambarkan kualitas internal beton keras. Nilai porositas menunjukkan besarnya volume rongga (*void*) yang terdapat di dalam beton, baik berupa udara terperangkap (*entrapped air*) maupun ruang kosong yang tidak terisi sempurna oleh pasta semen selama proses pemadatan. Oleh karena itu, tingkat pemadatan menjadi salah satu faktor yang secara langsung memengaruhi besarnya Porositas beton. Semakin efektif proses pemadatan dilakukan, semakin sedikit rongga udara yang tertinggal sehingga beton menjadi lebih padat dan homogen (Neville, 2011; Mindess et al., 2003).

Berdasarkan hasil penelitian, hubungan antara tingkat pemadatan dan Porositas menunjukkan kecenderungan yang jelas. Pada kondisi *Under-Compaction*, yaitu UC-10, UC-15, dan UC-20, diperoleh nilai Porositas berturut-turut sebesar 9,6%, 6,4%, dan 10,7%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa energi pemadatan yang belum mencukupi menyebabkan udara di dalam campuran beton belum dapat dikeluarkan secara optimal sehingga masih terbentuk rongga-rongga internal. Kondisi ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh Powers (1939), yang menyatakan bahwa energi pemadatan yang rendah belum mampu menghilangkan udara terperangkap maupun meruntuhkan susunan butiran agregat yang saling mengunci (*aggregate interlocking*), sehingga masih terbentuk rongga-rongga makro (*macro voids*) di dalam beton.

Nilai Porositas terendah diperoleh pada kondisi *Normal-Compaction* (NC-25) dengan nilai mendekati 0%, yang menunjukkan bahwa jumlah tumbukan optimum mampu menghasilkan susunan agregat dan pasta semen yang paling rapat. Pada kondisi ini, sebagian besar udara terperangkap telah berhasil dikeluarkan sehingga beton mencapai tingkat kepadatan maksimum tanpa menimbulkan gangguan terhadap stabilitas campuran. Hasil tersebut sesuai dengan rekomendasi ACI Committee 309 (2005) yang menyatakan bahwa pemadatan yang memadai akan meningkatkan kepadatan beton melalui pengurangan rongga

internal sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih homogen.

Meskipun demikian, terdapat anomali (*outlier*) pada variasi UC-20, di mana nilai Porositas meningkat menjadi 10,7%, lebih tinggi dibandingkan UC-10 maupun UC-15. Secara ilmiah, fenomena tersebut masih dapat dijelaskan sebagai konsekuensi dari proses pemadatan manual yang belum sepenuhnya seragam. Menurut Powers (1939), distribusi energi tumbukan yang tidak homogen dapat menyebabkan sebagian daerah beton telah mengalami pemadatan, sedangkan bagian lainnya masih menyisakan kantong udara (*air pockets*). Selain itu, variasi distribusi agregat kasar selama proses pengisian cetakan juga dapat menghasilkan rongga lokal (*localised voids*) yang meningkatkan porositas benda uji. Kondisi serupa juga dijelaskan oleh ACI Committee 309 (2005), bahwa pada pemadatan manual masih dimungkinkan terjadi variasi kepadatan antarbagian benda uji akibat ketidakteraturan distribusi energi pemadatan.

Sehingga, peningkatan Porositas pada variasi Benda Uji UC-20 terjadi menjadi 10,7%, atau sekitar 67,2% lebih tinggi dibandingkan UC-15. Dimana fenomena tersebut tidak mengikuti kecenderungan teoritis dapat dikategorikan sebagai variasi eksperimental (*experimental scatter*). Secara ilmiah, kondisi ini masih dapat dijelaskan karena proses pemadatan manual memiliki tingkat reproduktibilitas yang lebih rendah dibandingkan pemadatan menggunakan *vibrator* mekanis. Menurut ACI Committee 309 (2005), distribusi energi tumbukan yang tidak seragam dapat menyebabkan sebagian volume beton telah mengalami densifikasi, sedangkan bagian lainnya masih menyisakan kantong udara (*air pockets*). Selain itu, distribusi agregat kasar yang kurang homogen ketika proses pengisian cetakan juga dapat menghasilkan konsentrasi rongga lokal (*localised void concentration*), sehingga nilai Porositas benda uji meningkat meskipun jumlah tumbukan bertambah.

Dengan demikian, peningkatan Porositas pada UC-20 lebih tepat dipandang sebagai variasi lokal selama proses pembuatan benda uji daripada sebagai penyimpangan terhadap teori dasar pemadatan beton.

Berbeda dengan kondisi *Under-Compaction*, pada variasi *Over-Compaction* (OC-30, OC-35, dan OC-40) diperoleh nilai Porositas hasil perhitungan sebesar -1,1%, -1,0%, dan -1,2%. Secara fisik, Porositas tidak mungkin bernilai negatif. Nilai tersebut muncul karena berat volume aktual beton sedikit melebihi berat jenis teoritis acuan (2400 kg/m^3) yang digunakan dalam metode perhitungan penelitian ini. Dengan demikian, hasil tersebut diinterpretasikan bahwa porositas beton pada kondisi *Over-Compaction* praktis telah mendekati 0%, sehingga seluruh rongga udara yang sebelumnya masih tersisa telah terisi akibat meningkatnya tingkat kepadatan beton. Fenomena ini sesuai dengan konsep *maximum packing density* yang dikemukakan oleh Mindess et al. (2003), yaitu kondisi ketika energi pemadatan yang tinggi mampu meningkatkan kerapatan susunan partikel hingga mencapai kondisi sangat padat.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat pemadatan cenderung menurunkan Porositas Beton hingga mencapai kondisi optimum. Pada tahap *Under-Compaction*, energi pemadatan yang belum memadai menyebabkan terbentuknya rongga udara dalam jumlah besar sehingga Porositas meningkat. Sebaliknya, pada kondisi *Over-Compaction*, rongga udara hampir seluruhnya telah dieliminasi sehingga beton menjadi sangat padat, meskipun pada saat yang sama mulai muncul fenomena lain berupa *Bleeding* akibat pemisahan air dari campuran beton segar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingkat pemadatan mempunyai pengaruh yang sangat signifikan terhadap pembentukan Porositas beton, terutama pada kondisi pemadatan yang berada di bawah tingkat optimum.

Pengaruh Tingkat Pemadatan Terhadap Kuat Tekan

Kuat Tekan merupakan parameter mekanis esensial yang sangat sensitif terhadap perubahan struktur internal material. Berdasarkan tinjauan mekanika material beton, perubahan tingkat pemadatan secara langsung mendikte besarnya Porositas dan volume *Bleeding*, yang kemudian berimplikasi langsung pada degradasi atau eskalasi kapasitas dukung beban.

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori klasik yang dikemukakan oleh Neville (2011) dalam *Properties of Concrete* (5th Edition), khususnya pada pembahasan *Effect of Voids on Strength*, yang menunjukkan bahwa peningkatan rongga udara (*air voids*) atau Porositas akibat pemadatan yang tidak memadai berbanding terbalik dengan kuat tekan beton. Neville menjelaskan bahwa Porositas sekitar 5% dapat menurunkan Kuat Tekan hingga kurang lebih 30%, sedangkan Porositas mendekati 10% berpotensi menyebabkan penurunan Kuat Tekan hingga sekitar 60% dari kuat tekan beton yang seharusnya dicapai. Temuan tersebut konsisten dengan hasil penelitian ini, di mana kondisi *under-compaction* menghasilkan porositas yang tinggi dan diikuti oleh penurunan kuat tekan yang signifikan. Di sisi lain, fenomena outlier pada variasi 40 tumbukan (OC-40) diduga dipengaruhi oleh beberapa faktor eksperimental. Proses pemadatan secara manual menggunakan tamping rod sangat bergantung pada konsistensi operator, sehingga kedalaman penetrasi, sudut penusukan, serta besar gaya yang diberikan pada setiap tumbukan tidak dapat dipastikan sepenuhnya identik untuk setiap benda uji. Variasi kecil dalam proses pemadatan tersebut dapat memengaruhi tingkat kepadatan beton yang dihasilkan.

Selain faktor operator, distribusi agregat di dalam cetakan juga dapat memberikan pengaruh terhadap hasil kuat tekan. Walaupun proporsi material telah ditimbang sesuai mix design, proses pencampuran dan pengisian adukan ke dalam cetakan tetap memungkinkan terjadinya variasi lokal pada distribusi agregat kasar dan agregat halus. Pada benda uji 40 tumbukan (OC-40), diduga terjadi susunan agregat yang lebih seragam (*well-graded local aggregate*) sehingga menghasilkan kepadatan pengepakan (*packing density*) yang lebih tinggi. Kondisi tersebut memungkinkan butiran agregat saling mengunci (*aggregate interlocking*) secara lebih efektif dan mengurangi rongga internal, sehingga meskipun nilai *Bleeding* mencapai 0,241%, Kuat Tekan beton justru meningkat menjadi 27,92 MPa. Oleh karena itu, kenaikan kuat tekan pada variasi OC-40 lebih tepat dipandang sebagai konsekuensi dari kombinasi efek densifikasi lokal, variasi proses pemadatan manual, dan heterogenitas distribusi agregat, bukan semata-mata akibat penambahan jumlah tumbukan.

Pada variasi pemadatan kurang 10 tumbukan (UC-10) yang menghasilkan Porositas 9,6%, Kuat Tekan Beton anjlok menjadi 12,00 MPa, di mana berdasarkan kerangka teoretis Neville (2011) mengenai hubungan struktur pori dan kekuatan, kehadiran rongga udara terperangkap (*entrapped air*) secara masif memotong luas penampang efektif beton, sehingga secara kuantitatif nilai Porositas 9,6% ini memicu penurunan Kuat Tekan sebesar 55,0% apabila dikomparasikan langsung terhadap kondisi optimumnya (NC-25 sebesar 26,66 MPa).

Reduksi kekuatan yang hampir serupa dijelaskan pula oleh Mindess et al. (2003), di mana setiap kenaikan persentase volume rongga udara makro secara eksponensial mendegradasi kapasitas dukung beban aksial, yang terkonfirmasi pada variasi 15 tumbukan (UC-15) dengan porositas 6,4%, di mana kuat tekan tercatat 14,14 MPa atau mengalami penurunan kekuatan sebesar 46,9% dari kondisi normal.

Lebih lanjut, pada variasi 20 tumbukan (UC-20), porositas melonjak secara anomali hingga 10,7%, yang menyebabkan kuat tekan rata-rata jatuh ke angka 12,17 MPa atau mengalami penurunan sebesar 54,4%, di mana merujuk pada konsep mekanika keretakan beton (*fracture mechanics*) oleh ACI Committee 309 (2005) dan Powers (1939), kantong udara makro (*honeycomb*) yang terbentuk akibat kegagalan *aggregate interlocking* bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (*stress concentration point*).

Hal ini terbukti dari adanya sampel uji pada kelompok UC-20 yang runtuh prematur pada tegangan 9,45 MPa, yang merepresentasikan defisit kekuatan ekstrem hingga 64,5% dari kapasitas ideal akibat rongga tersebut membentuk apa yang disebut sebagai *weakest link path*; jalur atau rangkaian rongga terlemah di dalam penampang beton di mana tegangan luar terkonsentrasi secara masif, sehingga memicu perambatan retak (*crack propagation*) secara

instan dan menyebabkan spesimen mengalami kegagalan struktural jauh sebelum kapasitas material murninya tercapai.

Peningkatan energi menjadi 25 tumbukan (NC-25) terbukti sebagai kondisi ekuilibrium yang ideal dengan Porositas 0,0% dan *Bleeding* 0,00%, di mana Kuat Tekan melonjak tajam mencapai tegangan optimum sebesar 26,66 MPa yang jauh melampaui target mutu rencana konversi 7 hari sebesar 19,5 MPa karena energi mekanis berhasil mengeliminasi udara dan merapatkan susunan matriks interfisial secara sempurna tanpa memicu terjadinya Segregasi.

Memasuki fase pemadatan berlebih (*Over-Compaction*), kemunculan air bebas (*bleed water*) mulai mengorbankan integritas struktural beton, di mana pada variasi OC-30 dengan tingkat *Bleeding* sebesar 0,09%, Kuat Tekan tercatat turun ke angka 21,76 MPa yang berarti terjadi penurunan kekuatan sebesar 18,4% dari titik optimum. Degradasi ini semakin parah pada variasi OC-35 dengan peningkatan volume *Bleeding* menjadi 0,16% yang sukses menggerus Kuat Tekan turun ke angka 19,27 MPa atau merepresentasikan penurunan kekuatan yang signifikan sebesar 27,7%, di mana justifikasi ilmiah dari penurunan ini bersandar pada postulat Neville (2011) yang menyatakan bahwa air *Bleeding* yang bergerak naik melalui saluran kapiler (*Bleeding channels*) akan terperangkap di bawah agregat kasar, menciptakan mikrokantung air yang melemahkan ikatan fisik pada Zona Transisi Interfasial (*Interfacial Transition Zone/ITZ*) antara pasta semen dan agregat.

Meskipun demikian, sebuah lonjakan kekuatan mekanis (*spike up*) kembali terjadi pada pemadatan ekstrem 40 tumbukan (OC-40), di mana meskipun mencatatkan nilai *Bleeding* tertinggi sebesar 0,24%, kuat tekan justru meroket ke angka 27,92 MPa yang menandakan peningkatan kapasitas sebesar 4,7% di atas kondisi normal. Berdasarkan prinsip *Maximum Packing Density* oleh Kosmatka et al. (2003), karena adukan didesain dengan FAS rendah (0,45) yang kaku, volume *Bleeding* 0,24% masih berada jauh di bawah ambang batas kritis keparahan ASTM C232 di bawah 0,5% yang dikategorikan sebagai *negligible bleeding*. Oleh karena itu, tumbukan mekanis ekstrem sebanyak 40 kali tidak membentuk kantong air yang destruktif, melainkan memaksa partikel halus terisi sangat padat ke dalam pori mikro, sehingga mekanisme kunci antar-agregat di bagian inti tetap dominan dan mendongkrak nilai Kuat Tekannya.

Hubungan Porositas Terhadap Kuat Tekan

Porositas merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap kuat tekan beton karena mencerminkan besarnya volume rongga di dalam beton keras. Semakin besar porositas, semakin kecil luas penampang efektif yang mampu menahan beban tekan sehingga retak lebih mudah terbentuk dan berkembang. Oleh karena itu, secara teoritis hubungan antara Porositas dan Kuat Tekan bersifat berbanding terbalik (*negative correlation*) (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014). Hasil penelitian menunjukkan kecenderungan yang sesuai dengan teori tersebut. Pada variasi UC-10, pemadatan sebanyak 10 tumbukan menghasilkan porositas sebesar 9,6% dengan kuat tekan 12,00 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 55,0% dibandingkan kondisi optimum (NC-25). Ketika jumlah tumbukan ditingkatkan menjadi 15 tumbukan (UC-15), Porositas menurun menjadi 6,4%, sedangkan kuat tekan meningkat menjadi 14,14 MPa, meskipun masih 46,9% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum. Hasil ini menunjukkan bahwa penurunan Porositas akibat bertambahnya energi pemadatan diikuti oleh peningkatan kuat tekan beton.

Fenomena berbeda terjadi pada variasi UC-20, di mana pemadatan sebanyak 20 tumbukan menghasilkan porositas tertinggi sebesar 10,7%, sehingga kuat tekan kembali turun menjadi 12,17 MPa atau 54,4% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum. Kondisi ini menunjukkan adanya outlier terhadap tren umum. Menurut Powers (1939) dan Mindess et al. (2003), rongga udara berukuran besar (*macro voids*) berperan sebagai titik konsentrasi

tegangan (*stress concentration point*) sekaligus membentuk jalur terlemah (*weakest link path*), yaitu lintasan di dalam beton yang memiliki ketahanan paling rendah sehingga retak akan lebih mudah merambat melalui daerah tersebut. Akibatnya, beton mengalami keruntuhan lebih awal dan menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah. Kondisi optimum dicapai pada variasi NC-25, di mana pemadatan sebanyak 25 tumbukan menghasilkan porositas mendekati 0% dan kuat tekan sebesar 26,66 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa proses pemadatan telah mampu mengurangi hampir seluruh rongga udara terperangkap sehingga terbentuk struktur beton yang lebih padat dan homogen.

Menurut Mehta dan Monteiro (2014), meningkatnya kepadatan susunan partikel (*particle packing*) akan memperkecil jalur propagasi retak sehingga kemampuan beton dalam menahan beban tekan menjadi maksimum.

Pada kondisi *Over-Compaction*, hubungan antara pPorositas dan Kuat Tekan mulai berubah. Meskipun variasi OC-30, OC-35, dan OC-40 menunjukkan Porositas yang sangat rendah, Kuat Tekan tidak meningkat secara konsisten. Pada OC-30 dan OC-35, kuat tekan masing-masing menurun sebesar 18,4% dan 27,7% dibandingkan kondisi optimum, sedangkan pada OC-40 justru meningkat menjadi 27,92 MPa atau sekitar 4,7% lebih tinggi dibandingkan NC-25.

Hal ini menunjukkan bahwa setelah beton mencapai kepadatan maksimum, kuat tekan tidak lagi hanya dipengaruhi oleh porositas, tetapi juga oleh fenomena *bleeding* dan perubahan kualitas Interfacial Transition Zone (ITZ) akibat pemadatan berlebih (Neville, 2011). Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan porositas hingga 9,6–10,7% akibat *under-compaction* mampu menurunkan kuat tekan beton hingga 54,4–55,0% dibandingkan kondisi optimum. Sebaliknya, setelah porositas mencapai kondisi minimum, pengaruhnya terhadap kuat tekan mulai berkurang karena telah dipengaruhi oleh mekanisme lain, khususnya *bleeding* pada kondisi *over-compaction*.

Hubungan *Bleeding* Terhadap Kuat Tekan

Bleeding merupakan fenomena keluarnya air bebas ke permukaan beton segar akibat proses pengendapan partikel padat selama proses pemadatan. Pada tingkat tertentu, bleeding dapat menyebabkan terbentuknya lapisan pasta semen yang lebih lemah, meningkatkan porositas lokal pada Interfacial Transition Zone (ITZ), serta menurunkan kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat. Oleh karena itu, peningkatan bleeding umumnya diikuti oleh penurunan kuat tekan beton (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *bleeding* mulai muncul pada kondisi *over-compaction*. Pada variasi OC-30, pemadatan sebanyak 30 tumbukan menghasilkan *bleeding* sebesar 0,092%, yang diikuti penurunan kuat tekan menjadi 21,76 MPa, atau 18,4% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum (NC-25). Ketika jumlah tumbukan ditingkatkan menjadi 35 tumbukan (OC-35), *bleeding* meningkat menjadi 0,165%, sedangkan kuat tekan kembali turun menjadi 19,27 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 27,7% dibandingkan kondisi optimum. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan energi pemadatan yang memicu kenaikan *Bleeding* turut diikuti oleh penurunan kapasitas tekan beton.

Fenomena tersebut sejalan dengan teori Neville (2011) yang menyatakan bahwa air *bleeding* akan bergerak ke permukaan melalui saluran kapiler (*Bleeding channels*) dan sebagian terakumulasi di bawah butiran agregat kasar. Kondisi ini membentuk *water pockets* yang memperlemah *Interfacial Transition Zone* (ITZ) sehingga ikatan antara pasta semen dan agregat menjadi kurang efektif dalam menahan beban tekan. Semakin besar volume bleeding yang terjadi, semakin besar pula potensi terbentuknya zona lemah di dalam beton.

Namun demikian, hasil berbeda ditunjukkan oleh variasi OC-40. Meskipun pemadatan sebanyak 40 tumbukan menghasilkan bleeding tertinggi sebesar 0,241%, kuat tekan justru

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³

meningkat menjadi 27,92 MPa, atau sekitar 4,7% lebih tinggi dibandingkan kondisi optimum. Fenomena ini merupakan outlier positif yang dapat dijelaskan oleh konsep *Maximum Packing Density* (Kosmatka et al., 2003). Pada campuran beton dengan FAS 0,45, peningkatan energi pemadatan masih mampu meningkatkan kepadatan susunan partikel sehingga efek densifikasi lebih dominan dibandingkan pengaruh negatif bleeding. Selain itu, nilai bleeding maksimum sebesar 0,241% masih berada jauh di bawah batas 0,5% yang dikategorikan sebagai negligible bleeding menurut ASTM C232/C232M, sehingga belum cukup besar untuk menyebabkan penurunan kuat tekan secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tingkat pemadatan dari 30 hingga 35 tumbukan menyebabkan *bleeding* meningkat dari 0,092% menjadi 0,165%, yang diikuti penurunan kuat tekan dari 21,76 MPa menjadi 19,27 MPa atau sekitar 9,6%. Akan tetapi, pada 40 tumbukan, peningkatan *bleeding* hingga 0,241% tidak lagi diikuti penurunan kuat tekan karena pengaruh densifikasi partikel lebih dominan dibandingkan efek negatif *bleeding*. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara bleeding dan kuat tekan tidak selalu bersifat linier, melainkan dipengaruhi pula oleh karakteristik campuran beton dan tingkat kepadatan internal yang terbentuk selama proses pemadatan. (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014; ASTM C232/C232M).

Sintesis dan Hubungan Antar Variabel

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pemadatan merupakan variabel utama yang mengendalikan terbentuknya porositas dan bleeding, yang selanjutnya memengaruhi kuat tekan beton. Pada kondisi *under-compaction*, energi pemadatan yang diberikan belum mampu mengeluarkan udara terperangkap (*entrapped air*) secara optimal sehingga terbentuk rongga-rongga di dalam beton. Sebaliknya, pada kondisi *over-compaction*, rongga udara telah mencapai kondisi minimum sehingga energi tumbukan selanjutnya tidak lagi mengurangi porositas, tetapi justru mendorong terjadinya bleeding akibat pengendapan agregat dan perpindahan air bebas menuju permukaan beton (Neville, 2011; ACI Committee 309, 2005).

Pada variasi UC-10, pemadatan sebanyak 10 tumbukan menghasilkan porositas 9,6%, tanpa terjadi *bleeding* (0,00%), sehingga kuat tekan turun menjadi 12,00 MPa, atau 55,0% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum (NC-25). Peningkatan energi pemadatan menjadi 15 tumbukan (UC-15) menurunkan porositas menjadi 6,4% dan meningkatkan kuat tekan menjadi 14,14 MPa, meskipun masih 46,9% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum. Pada UC-20, porositas kembali meningkat menjadi 10,7%, sehingga kuat tekan turun menjadi 12,17 MPa, atau 54,4% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *under-compaction* didominasi oleh pengaruh porositas, di mana semakin besar rongga yang terbentuk maka semakin besar pula penurunan kuat tekan beton.

Kondisi terbaik diperoleh pada NC-25, yaitu pemadatan sebanyak 25 tumbukan yang menghasilkan porositas mendekati 0%, *Bleeding* 0,00%, dan Kuat Tekan maksimum sebesar 26,66 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa energi pemadatan telah cukup untuk menghilangkan udara terperangkap tanpa menyebabkan pemisahan air dari campuran, sehingga terbentuk struktur beton yang padat, homogen, dan memiliki kapasitas tekan optimum. Menurut Mehta dan Monteiro (2014), kondisi tersebut merepresentasikan *optimum compaction*, yaitu keseimbangan antara kepadatan internal dan stabilitas campuran beton.

Memasuki kondisi *Over-Compaction*, mekanisme yang memengaruhi kuat tekan mulai berubah. Pada OC-30, pemadatan sebanyak 30 tumbukan menghasilkan porositas -1,1% dan *bleeding* 0,092%, yang menyebabkan Kuat Tekan turun menjadi 21,76 MPa, atau 18,4% lebih rendah dibandingkan kondisi optimum. Ketika jumlah tumbukan ditingkatkan menjadi 35 tumbukan (OC-35), *Bleeding* meningkat menjadi 0,165%, sedangkan Kuat Tekan kembali turun menjadi 19,27 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 27,7% dibandingkan kondisi

optimum. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa setelah Porositas mencapai kondisi minimum, peningkatan energi pemadatan lebih banyak memicu *Bleeding* yang menyebabkan melemahnya *Interfacial Transition Zone* (ITZ) akibat terbentuknya lapisan air di sekitar agregat (Neville, 2011).

Fenomena berbeda terjadi pada OC-40. Meskipun pemadatan sebanyak 40 tumbukan menghasilkan *Bleeding* tertinggi sebesar 0,241% dengan porositas -1,2%, kuat tekan justru meningkat menjadi 27,92 MPa, atau sekitar 4,7% lebih tinggi dibandingkan kondisi optimum. Fenomena ini menunjukkan bahwa nilai *Bleeding* yang masih tergolong sangat rendah (<0,5%) menurut ASTM C232/C232M belum cukup untuk menyebabkan kerusakan struktur internal beton.

Sebaliknya, energi pemadatan yang lebih besar masih mampu meningkatkan *packing density* partikel sehingga efek densifikasi lebih dominan dibandingkan pengaruh negatif bleeding (Kosmatka et al., 2003; Mehta & Monteiro, 2014).

Secara keseluruhan, hasil penelitian membuktikan bahwa *Under-Compaction* terutama memengaruhi kuat tekan melalui peningkatan Porositas, sedangkan *Over-Compaction* memengaruhi kuat tekan melalui munculnya *Bleeding*. Dengan demikian, tingkat pemadatan berperan sebagai variabel pengendali yang menentukan kualitas beton, di mana pemadatan yang terlalu rendah meningkatkan porositas hingga 10,7% dan menurunkan kuat tekan hingga 55,0%, sedangkan pemadatan yang terlalu tinggi meningkatkan bleeding hingga 0,241% dengan respons kuat tekan yang dipengaruhi oleh keseimbangan antara efek *bleeding* dan peningkatan kepadatan internal beton. Hasil ini memperlihatkan bahwa hubungan antara tingkat pemadatan, porositas, *bleeding*, dan kuat tekan merupakan suatu mekanisme yang saling berkaitan dan tidak dapat dianalisis secara terpisah.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh Tingkat Pemadatan (*Under-Compaction* dan *Over-Compaction*) terhadap *Bleeding*, Porositas, dan Kuat Tekan Beton Normal Mutu Rencana f_c 30 MPa, dengan variasi jumlah tumbukan sebanyak 10, 15, 20, 25, 30, 35, dan 40 tumbukan, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Karakteristik Beton Segar berdasarkan hasil Pengujian *Slump* menunjukkan nilai rata-rata sebesar 7,5 cm (75 mm). Nilai tersebut menunjukkan bahwa campuran beton memiliki tingkat kelecakan (*Workability*) yang cukup baik untuk proses pengecoran dengan konsistensi sedang. Kondisi ini dipengaruhi oleh penggunaan Faktor Air-Semen (FAS) sebesar 0,45 tanpa penambahan bahan tambah kimia (*Admixture*). Nilai *Slump* yang diperoleh telah memenuhi rentang 7,5–15 cm menurut PBI 1971 untuk pekerjaan beton struktural, serta berada dalam rentang 25–100 mm berdasarkan SNI 7656:2012. Dengan demikian, campuran beton dinilai memiliki *Workability* yang memadai dan layak digunakan tanpa penambahan air maupun *Admixture*, sehingga karakteristik campuran tetap terjaga dan tidak memengaruhi analisis pengaruh tingkat pemadatan terhadap sifat beton.
2. Jumlah tingkat pemadatan memengaruhi kecenderungan terjadinya *Bleeding* pada Beton Segar. Pada variasi UC-10, UC-15, UC-20, dan NC-25, tidak terdeteksi adanya *Bleeding*, dengan nilai sebesar 0,00%. Fenomena *Bleeding* mulai terdeteksi pada kondisi *Over-Compaction*, yaitu sebesar 0,092% pada OC-30, meningkat menjadi 0,165% pada OC-35, dan mencapai 0,241% pada OC-40. Dengan demikian, data menunjukkan adanya kecenderungan bahwa peningkatan jumlah tumbukan di atas kondisi pemadatan normal meningkatkan *Bleeding*. Meskipun demikian, nilai *Bleeding* yang diperoleh masih relatif kecil sehingga pengaruhnya terhadap penurunan Kuat Tekan tidak menunjukkan pola keruntuhan yang drastis.
3. Tingkat Pemadatan memberikan pengaruh terhadap Berat Volume dan nilai Porositas

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³

- Beton. Pada kondisi *Under-Compaction*, diperoleh nilai Porositas sebesar 9,6% pada UC-10, 6,4% pada UC-15, dan 10,7% pada UC-20. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemadatan yang belum mencukupi cenderung menghasilkan berat volume yang lebih rendah dan rongga internal yang lebih besar. Namun, nilai UC-20 yang mencapai 10,7% menunjukkan adanya fluktuasi data yang tidak mengikuti kecenderungan monoton. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh distribusi rongga yang tidak seragam, variasi lokal susunan agregat, serta keterbatasan jumlah benda uji yang digunakan dalam pengujian Porositas.
4. Pada kondisi NC-25, berat volume aktual mencapai 2.400 kg/m³ dan menghasilkan nilai Porositas sebesar 0,0% berdasarkan pendekatan perhitungan yang digunakan. Sementara itu, pada OC-30, OC-35, dan OC-40, Berat Volume aktual masing-masing mencapai 2.425,8 kg/m³, 2.425,1 kg/m³, dan 2.428,9 kg/m³. Nilai Berat Volume tersebut lebih besar daripada Berat Volume acuan sebesar 2.400 kg/m³ sehingga menghasilkan nilai matematis negatif sebesar -1,1%, -1,0%, dan -1,2%. Nilai tersebut secara fisik tidak dapat diinterpretasikan sebagai Porositas negatif. Oleh karena itu, nilai tersebut lebih tepat dipahami sebagai hasil matematis akibat Berat Volume aktual yang melampaui nilai acuan, sehingga nilai Porositas berdasarkan pendekatan tersebut dinyatakan mendekati 0%.
 5. Tingkat Pemadatan memberikan pengaruh yang nyata terhadap Kuat Tekan Beton pada umur pengujian 7 hari. Nilai Kuat Tekan rata-rata yang diperoleh adalah 12,00 MPa pada UC-10, 14,14 MPa pada UC-15, 12,17 MPa pada UC-20, 26,66 MPa pada NC-25, 21,76 MPa pada OC-30, 19,27 MPa pada OC-35, dan 27,92 MPa pada OC-40. Berdasarkan hasil tersebut, kondisi *Under-Compaction* menghasilkan Kuat Tekan yang relatif lebih rendah dibandingkan NC-25 karena pemadatan yang tidak mencukupi menyebabkan masih terdapat rongga internal yang mengurangi luas penampang efektif dan kontinuitas matriks beton.
 6. Hubungan antara Tingkat Pemadatan dan Kuat Tekan tidak menunjukkan pola linear yang sempurna. Peningkatan jumlah tumbukan dari kondisi *Under-Compaction* menuju NC-25 meningkatkan Kuat Tekan secara signifikan. Namun, setelah melewati NC-25, kuat tekan mengalami penurunan pada OC-30 dan OC-35, kemudian meningkat kembali pada OC-40. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak dapat menyimpulkan bahwa penambahan jumlah tumbukan secara terus-menerus selalu menyebabkan penurunan Kuat Tekan. Sebaliknya, data menunjukkan bahwa pengaruh *Over-Compaction* terhadap Kuat Tekan dipengaruhi oleh interaksi antara peningkatan kerapatan beton, perubahan distribusi material, *Bleeding*, dan kemungkinan variasi internal benda uji.
 7. Berdasarkan seluruh parameter yang diuji, kondisi NC-25 merupakan titik referensi pemadatan normal yang menghasilkan keseimbangan antara rendahnya Porositas terukur, tidak terdeteksinya *Bleeding*, dan Kuat Tekan rata-rata yang tinggi sebesar 26,66 MPa. Namun demikian, apabila hanya ditinjau berdasarkan nilai Kuat Tekan rata-rata, OC-40 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 27,92 MPa. Oleh karena itu, OC-40 tidak dapat langsung ditetapkan sebagai kondisi pemadatan optimum secara keseluruhan, karena pada kondisi tersebut juga terjadi nilai *Bleeding* tertinggi sebesar 0,241%. Dengan demikian, penentuan kondisi pemadatan terbaik perlu mempertimbangkan keterkaitan antara Kuat Tekan, Porositas, dan *Bleeding*, bukan hanya berdasarkan satu parameter Sifat Beton (Kuat Tekan) saja.
 8. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat pemadatan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi karakteristik beton segar dan beton keras. *Under-Compaction* cenderung meningkatkan pembentukan rongga internal dan menurunkan Kuat Tekan, sedangkan *Over-Compaction* meningkatkan kecenderungan terjadinya *Bleeding* dan menghasilkan perubahan Berat Volume Beton. Hubungan antara Tingkat Pemadatan, Porositas, *Bleeding*, dan Kuat Tekan tidak bersifat sederhana atau sepenuhnya linear, sehingga kondisi pemadatan harus dikendalikan secara tepat untuk memperoleh beton

dengan tingkat kerapatan dan kekuatan yang optimal.

Daftar Pustaka

- Abrams, D. A. (1918). *Design of Concrete Mixtures*. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago.
- ACI Committee 309. (2013). *Effect of Compaction Methods on Compressive Strength of Concrete*. American Concrete Institute.
- ASTM C29/C29M-17a. (2017). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C33/C33M-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.
- ASTM C39/C39M-21. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM C70-20. (2020). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C127-15. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C128-15. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C136/C136M-19. (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International.
- ASTM C143/C143M-20. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International.
- ASTM C150/C150M-22. (2022). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International.
- ASTM C192/C192M-19. (2019). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International.
- ASTM C232/C232M-14. (2014). *Standard Test Method for Bleeding of Concrete*. ASTM International.
- ASTM C469/C469M-14. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International.
- Chen, L., et al. (2023). "Microstructural Analysis of Concrete with Different Compaction Levels."
- Hassan, M., et al. (2020). "Impact of Improper Compaction on Structural Performance of Concrete."
- Hidayat, T., & Firmansyah, R. (2021). "Hubungan Porositas dan Kuat Tekan Beton Akibat Variasi Pemadatan." *Jurnal Infrastruktur*, 7(3), 145–153.
- Kim, J., & Lee, H. (2018). "Effect of Compaction Energy on the Mechanical Properties and Porosity of Concrete."
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures* (16th ed.). Portland Cement Association.
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). "Influence of Bleeding on the Microstructure of Concrete." *Cement and Concrete Research*.
- Kwan, A. K. H., & Wong, H. H. C. (2015). "Effect of Consolidation Methods on Concrete Properties."
- Li, X., et al. (2022). "Experimental Study on Bleeding and Segregation of Concrete with High Workability."
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin¹, Sholahuddin Azhar Widagdo², Prabowo Setyawan³

- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Pearson Education.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Penerbit Andi.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (2nd ed.). Pearson Education.
- Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971) (PBI 1971) N.I.-2. (1971). *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Popovics, S. (1998). *Strength and Related Properties of Concrete: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons.
- Powers, T. C. (1939). *The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete* (Research Laboratory Bulletin 2). Portland Cement Association.
- Prasetyo, A., & Nugroho, S. (2020). "Pengaruh *Over Compaction* terhadap Segregasi dan *Bleeding* Beton." *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 22(1), 55–64.
- Putra, D. A., & Kurniawan, B. (2019). "Pengaruh Durasi Vibrasi terhadap Karakteristik Beton." *Jurnal Teknik Sipil*, 15(1), 33–41.
- Rahman, M., et al. (2021). "*Influence of Compaction on Porosity and Strength of Concrete.*"
- Rahmawati, N., & Saputra, H. (2022). "Analisis *Under Compaction* pada Beton Normal terhadap *Void* dan Kekuatan Beton." *Jurnal Bangunan dan Struktur*, 11(2), 87–96.
- Roussel, N., et al. (2017). "*Influence of Improper Compaction on Bleeding and Segregation in Fresh Concrete.*"
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2018). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press.
- SNI 1968:1990. (1990). *Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-4142-1996. (1996). *Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-4804-1998. (1998). *Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1972:2008. (2000). *Cara Uji Slump Beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1973:2008. (2008). *Cara Uji Berat Isi, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara Beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2417:2008. (2008). *Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1971:2011. (2011). *Cara Uji Kadar Air Total Agregat dengan Pengeringan*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1974:2011. (2011). *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 7656:2012. (2012). *Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Badan Standardisasi Nasional.
- Suryadi, et al. (2018). "Pengaruh Jumlah Tumbukan terhadap Kuat Tekan Beton." *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*.
- Tang, L., & Nilsson, L. O. (1992). "*Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field.*" *ACI Materials Journal*, 89(1), 49–53.
- Troxell, G. E., Davis, H. E., & Kelly, J. W. (1968). *Composition and Properties of Concrete*. McGraw-Hill.
- Wahyudi, L., & Syahrul. (2018). "Pengaruh Variasi Pemadatan terhadap Kuat Tekan Beton Normal." *Jurnal Rekayasa Sipil*, 12(2), 101–109.
- Zhang, Y., et al. (2019). "*Effect of Internal Bleeding on Interfacial Transition Zone of Concrete.*"
- SNI 03-1974-1990. (1990). *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Badan Standardisasi

Pengaruh Tingkat Pemadatan (Under-Compaction & Over-Compaction) Terhadap Porositas, Bleeding, Dan Kuat Tekan Beton

Moh Syakir Aliyudin ¹, Sholahuddin Azhar Widagdo ², Prabowo Setyawan ³

Nasional.

ACI Committee 211. (2002). ACI 211.1-91: *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute.

SNI 03-2834-2000. (2000). *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Badan Standardisasi Nasional.