

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan analisis data yang telah dilakukan pada penelitian pemanfaatan limbah abu tempurung kelapa (ATK) dan serbuk sabut kelapa (*cocopeat*/CPT) sebagai material substitusi pada *paving porous*, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan limbah abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa terbukti memberikan pengaruh terhadap nilai kuat tekan *paving porous* berdasarkan hasil penelitian. Meskipun nilai kuat tekan yang dihasilkan belum mampu mencapai target 17 MPa yang disyaratkan dalam SNI 03-0691-1996 untuk paving konvensional, hasil ini sangat wajar mengingat karakteristik inherent beton berpori yang secara sengaja mengorbankan kepadatan matriks demi memaksimalkan permeabilitas air. Nilai yang diperoleh masih relevan dengan standar internasional (ACI 522R-10) untuk perkerasan berpori beban ringan. Abu tempurung kelapa berperan sebagai material pengisi pori mikro, namun proporsi *cocopeat* yang organik dan lunak secara signifikan menurunkan daya dukung struktural sehingga beton lebih mudah retak saat menerima beban tekan.
2. Seluruh variasi campuran menunjukkan fluktuasi pada nilai daya serap air, di mana Variasi ATK0-CPT0 (kontrol) memiliki daya serap sebesar 3,51%. Seiring penambahan substitusi, nilai penyerapan air cenderung menurun secara nyata hingga mencapai kondisi paling optimal pada Variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 2,90%. Kondisi ini terjadi karena kandungan silika pada abu tempurung kelapa berfungsi sebagai *filler* yang merapatkan rongga-rongga kecil pada struktur paving. Namun, seiring bertambahnya komposisi *cocopeat* pada Variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15 dengan nilai daya serapnya berturut 3,27%, 3,42%, dan 3,67%, nilai daya serap air kembali meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa sifat alami serat *cocopeat* yang hidroskopis serta kemampuannya membentuk rongga tambahan memicu air lebih mudah terserap ke dalam material.

3. Hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa seluruh variasi *paving porous* masih berada di bawah batas maksimum 10%, sehingga dapat dinyatakan memenuhi kriteria fungsional yang diharapkan. Variasi ATK0-CPT0 mencatatkan nilai porositas sebesar 8,41%, sedangkan Variasi ATK2,5-CPT0 mencatatkan nilai porositas terendah yaitu 6,95%, yang menunjukkan struktur paling padat akibat pengisian pori oleh abu tempurung kelapa tanpa gangguan dari *cocopeat*. Nilai porositas cenderung mengalami peningkatan secara bertahap seiring dengan meningkatnya kadar limbah *cocopeat* dalam campuran, Variasi ATK2,5-CPT5 sebesar 7,72% dan variasi ATK2,5-CPT10 7.98% sebesar hingga mencapai 8,44% pada Variasi ATK2,5-CPT15. Peningkatan rongga ini disebabkan oleh sifat *cocopeat* yang ringan dan berpori, sehingga menghambat proses pemadatan *paving* secara maksimal.
4. Pengujian nilai permeabilitas atau laju infiltrasi air menunjukkan bahwa penggunaan variasi bahan tambah abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa (*cocopeat*) memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap performa drainase *paving porous*. Nilai laju permeabilitas yang diperoleh pada Variasi ATK0-CPT0 (kontrol) adalah sebesar 565,8 mm/menit, yang kemudian mengalami sedikit penurunan pada Variasi ATK2,5-CPT0 menjadi 531,5 mm/menit. Penurunan di Variasi ATK2,5-CPT0 ini terjadi akibat efek pengisian pori mikro (*pore filling effect*) oleh partikel halus abu tempurung kelapa yang membuat matriks semen sedikit lebih rapat. Namun, seiring dengan mulai disubstitusikannya pasir oleh *cocopeat*, terjadi tren kenaikan laju infiltrasi yang sangat drastis dan linear, yaitu meningkat pada Variasi ATK2,5-CPT5 menjadi 626,4 mm/menit, dilanjutkan pada Variasi ATK2,5-CPT10 sebesar 762,58 mm/menit, hingga mencapai puncaknya pada Variasi ATK2,5-CPT15 dengan kemampuan mengalirkan air sebesar 876,9 mm/menit. Lonjakan nilai permeabilitas yang signifikan ini membuktikan bahwa karakteristik serat *cocopeat* yang ringan, berongga, dan kurang padat dibandingkan pasir alami secara efektif mampu menciptakan sistem interkoneksi jalur air (pori makro) yang sangat terbuka di dalam struktur internal *paving*. Dengan demikian, semakin tinggi persentase limbah *cocopeat* yang digunakan, maka kemampuan

fungsional *paving porous* dalam mengalirkan air akan semakin optimal guna mereduksi limpasan permukaan (*surface runoff*) secara masif.

5. Berdasarkan hasil uji *Cantabro Loss* (keausan), penambahan substitusi material organik memberikan dampak negatif pada penurunan kekuatan ikat antar agregat. *Paving* kontrol (Variasi ATK0-CPT0) memiliki nilai kehilangan massa sebesar 52,1%, yang kemudian melonjak signifikan menjadi 70,3% pada Variasi ATK2,5-CPT5. Peningkatan keausan ini terjadi karena sifat *cocopeat* yang lunak memperlemah zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone*), sehingga luas permukaan kontak antar agregat berkurang dan agregat lebih mudah terlepas saat menerima beban abrasi.
6. Berdasarkan hasil analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB) produksi *paving porous*, didapatkan total biaya pembuatan untuk masing-masing sampel yang menunjukkan tingkat efisiensi bervariasi tergantung pada persentase penggunaan material limbah. Rincian biaya produksi material tersebut adalah sebagai berikut: untuk Variasi ATK0-CPT0 (Kontrol) adalah sebesar Rp1.142,21 per buah atau Rp57.110,50 per 1 m<sup>2</sup>, Variasi ATK2,5-CPT0 sebesar Rp1.133,18 per buah atau Rp56.659 per 1 m<sup>2</sup>, Variasi ATK2,5-CPT5 sebesar Rp1.134,24 per buah atau Rp56.712 per 1 m<sup>2</sup>, Variasi ATK2,5-CPT10 sebesar Rp1.135,13 per buah atau Rp56.756,6 per 1 m<sup>2</sup>, dan Variasi ATK2,5-CPT15 sebesar Rp1.136,18 per buah atau Rp56.809 per 1 m<sup>2</sup>. Rendahnya nominal pembiayaan ini dipengaruhi oleh minimalisnya pengeluaran untuk pembelian agregat pasir alami dan semen komersial yang telah berhasil disubstitusi sebagian oleh material limbah pertanian yang ekonomis dan mudah diperoleh di lingkungan sekitar. Dengan demikian, inovasi *paving porous* ini tidak hanya unggul dari aspek ekologis sebagai infrastruktur hijau resapan air, tetapi juga sangat kompetitif dan layak diproduksi secara massal dari kacamata finansial.

## 5.2. Saran

Berdasarkan serangkaian proses mulai dari studi literatur, pembuatan benda uji, pengujian, hingga tahap analisis hasil penelitian, terdapat beberapa saran untuk pengembangan maupun penelitian selanjutnya:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji penggunaan zat aditif tambahan, seperti *superplasticizer* atau perekat khusus polimer, guna mengatasi tingginya keausan (*Cantabro Loss* yang mencapai 70,3%). Hal ini bertujuan untuk menghasilkan ikatan matriks (*interlocking*) yang jauh lebih kuat dan konsisten tanpa perlu mengorbankan rongga permeabilitas, hal tersebut disebabkan karena penelitian ini masih memiliki kelemahan pada kohesi internal akibat penggunaan material organik.
2. Perlu metode pengujian lapangan yang lebih komprehensif, seperti uji penyumbatan (*clogging test*) serta uji ketahanan terhadap siklus cuaca ekstrem (basah-kering). Pengujian ini penting agar diperoleh data valid mengenai seberapa lama *paving porous* ini mampu mempertahankan laju infiltrasinya ketika terpapar langsung oleh endapan debu dan tanah dalam kondisi lingkungan yang sesungguhnya.
3. Penelitian lanjutan dapat mempertimbangkan perbaikan pada proses preparasi material, seperti menggunakan alat pembakar *furnace* bersuhu terkontrol untuk abu tempurung kelapa agar menghasilkan sifat *pozzolanic* yang maksimal. Selain itu, karena karakteristik keausan yang tinggi, pengaplikasian *paving porous* dengan variasi *cocopeat* masif ini secara teknis harus dibatasi dan difokuskan secara eksklusif untuk area dengan beban lalu lintas ringan, seperti taman kota atau jalur pejalan kaki (*pedestrian*).
4. Dengan karakteristik laju infiltrasi yang sangat tinggi namun kuat tekan yang terbatas, *paving porous* dengan variasi *cocopeat* tinggi (seperti Variasi ATK2,5-CPT10 dan ATK2,5-CPT15) lebih disarankan untuk diaplikasikan pada area dengan beban lalu lintas ringan, seperti area pejalan kaki (*pedestrian*), taman kota, atau pelataran parkir kendaraan ringan.