

REKAYASA ALAT PEMBUATAN BENDA UJI BAHAN PERKERASAN SKALA LABORATORIUM

Sri Sunarjono^{1*}, Aliem Sudjatmiko², Riyanto³, Aris⁴

^{1,2}Dosen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

^{3,4}Mahasiswa Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Pabelan Kartasura Tromol Pos I Surakarta 57102 Telp. 0271-717417

*Email: Sri.Sunarjono@ums.ac.id

Abstrak

Paper ini melaporkan hasil rekayasa alat pembuatan benda uji bahan perkerasan di Laboratorium Jalan Raya Universitas Muhammadiyah Surakarta. Langkah-langkah pembuatan benda uji dimulai dari penyiapan bahan, proses pencampuran, proses pemadatan, dan proses perawatan. Paper ini membahas hasil rekayasa alat pencampur dan alat pemadat. Metode rekayasa dipisahkan dalam tiga tahap. Tahap pertama, kajian literatur terhadap pengembangan alat terkait. Tahap kedua, penyusunan desain dan gambar kerja. Tahap ketiga, proses manufaktur dan penyusunan manual penggunaan alat. Alhamdulillah telah dihasilkan dua rekayasa alat, yaitu alat mixer campuran beraspal (AMCA) dan alat pemadat roller slab (APRS). Rekayasa AMCA masih dalam tahap desain, sedangkan APRS sudah dimanufaktur. Desain AMCA menggunakan bahan drum, dan agitator baja, sehingga dapat mengaduk sekitar maksimal 50 kg campuran aspal. Bahan campuran dimasukkan melalui inlet di bagian samping, dan dituangkan melalui outlet di bagian bawah drum. AMCA didesain dengan dilengkapi alat thermometer. APRS didesain dengan menggunakan beban penggilas roller baja, dan dapat memadatkan bahan campuran sekitar 40 kg. Cetakan benda uji berukuran lebar 30cm panjang 100cm dan tinggi 7cm. APRS sudah dilengkapi alat ekstruder untuk mengeluarkan sampel dari cetakan. Benda uji didapatkan dengan cara melakukan core drill pada sampel yang telah dipadatkan.

Kata kunci: alat laboratorium, bahan perkerasan, mixer, alat pemadat, campuran beraspal.

1. PENDAHULUAN

Salah satu kelemahan kualitas penelitian di Indonesia adalah kualitas alat laboratorium. Pada umumnya alat laboratorium yang ada merupakan hasil rekayasa peneliti luar negeri. Laboratorium selalu membeli alat dari luar negeri yang harganya mahal, dan teknisi tidak memahami cara kerja dan pemeliharannya. Hal ini menjadi salah satu penyebab penelitian di Indonesia selalu beberapa langkah di belakang penelitian luar negeri. Kebiasaan kurang baik ini harus diakhiri, harus ada upaya berani untuk memulai gerakan penelitian rekayasa alat.

Paper ini melaporkan hasil penelitian berupa rekayasa dua buah alat laboratorium, yaitu alat *mixer* campuran beraspal (AMCA) dan alat pemadat *roller slab* (APRS). Kedua alat ini digunakan untuk membuat benda uji bahan perkerasan di laboratorium. Benda uji tersebut diperlukan untuk menyusun *mix design*, atau melakukan pengujian properties bahan. Prosedur pembuatan benda uji pada umumnya dimulai dari penyiapan bahan, proses pencampuran, proses pemadatan, dan proses perawatan.

Tujuan penelitian adalah untuk menghasilkan rekayasa alat laboratorium untuk mendukung kualitas penelitian dibidang pengembangan bahan perkerasan. Penelitian juga diarahkan agar penelitian tidak bergantung kepada alat luar negeri yang harganya relatif mahal, dan para teknisi tidak memahami baik dalam mengoperasikan maupun memelihara alat tersebut.

PROSES PENCAMPURAN DI ASPHALT MIXING PLANT (AMP)

Pencampuran Aspal Panas (*Hot Mix*)

Inti pencampuran bahan campuran beraspal dengan sistem panas (*hot mix*) adalah kedua komponen bahan agregat dan aspal sama-sama dipanaskan mencapai target suhu tertentu, dan kemudian kedua komponen bahan tersebut dicampur dalam keadaan panas. Kunci kesuksesan alat pencampur adalah homogenitas campuran tanpa terjadi degradasi dan segregasi agregat. Tercapainya homogenitas campuran sangat dipengaruhi oleh suhu komponen bahan, sehingga alat mixer yang baik adalah yang mampu mengontrol suhu campuran.

Prosedur pencampuran bahan campuran beraspal di AMP adalah sebagai berikut:

1. Langkah pertama mengambil agregat yang sudah di pisahkan menurut ukuran yang telah ditentukan sebelum diproses ke alat AMP. Kemudian agregat tersebut dibawa ke bin dingin (*cold bins*) dengan Wheel Loader
2. Agregat yang sudah berada di bin dingin yang disesuaikan dengan fraksi-fraksinya kemudian dikeluarkan melalui pintu pengeluaran agregat yang dipasang dibawah dari bagian bin dingin. Pintu bukaan disesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan.
3. Agregat yang telah dikeluarkan pintu pengeluaran diteruskan pada sistem pemasok agregat dingin (*cold elevator*) menuju ke drum pengering, tipikal sistem pemasok agregat dingin.
4. Dari bin dingin agregat dibawa melalui (*cold elevator*) dinaikkan ke dalam pengering (*dryer*) untuk dipanaskan dan dikeringkan pada temperatur yang diinginkan.
5. Setelah agregat dipanaskan dan dikeringkan dalam *dryer*, agregat diayak pada unit ayakan panas (*hot screening unit*). Proses ini bertujuan untuk menyaring dan memisahkan dalam beberapa ukuran yang selanjutnya akan dikirim ke bin panas.
6. Agregat yang sudah disaring pada unit ayakan panas kemudian berada pada ruangan bin panas (*hot bin*) yang fraksi-fraksinya akan mengisi dengan sendirinya.
7. Sebelum melakukan proses pencampuran (*pugmill*) agregat tersebut ditimbang dengan timbangan agregat (*aggregate weight hopper*) yang terletak dibawah (*hot bin*). Proses pencampuran (*pugmill*) dilakukan setelah aspal, agregat dan bahan pengisi (bila perlu) dimasukkan ke dalam pencampur (*pugmill*). Aspal untuk pencampuran disimpan didalam bak penampung, agar memperoleh tingkat keenceran yang cukup saat melakukan penyemprotan dilakukan. Waktu yang diperlukan dalam proses ini sangat singkat untuk mencegah *oksidasi* yang berlebih. Selain itu juga harus diperoleh penyelimutan yang seragam pada semua butiran agregat oleh aspal. Umumnya waktu yang diperlukan untuk pencampuran sekitar 30-45 detik pada alat AMP. Temperature dari agregat panas yang berada di dalam *pugmill* sekitar 175°C, sedangkan untuk aspal 170°C. Kondisi ini diperlukan untuk memperoleh temperature campuran beraspal panas (*hot mix*) $\pm 150^{\circ}\text{C}$, maksimal 165°C. Apabila menggunakan bahan pengisi dapat langsung dituangkan saat proses pencampuran terjadi.
8. Pada saat proses AMP berjalan merupakan komponen yang selalu harus ada untuk menjaga kebersihan udara dan lingkungan dari debu-debu halus yang ditimbulkan saat proses berlangsung adalah pengumpul debu (*dust collector*).

Pencampuran Aspal Dingin (*Cold Mix*)

Cold mix sangat berbeda dengan *hot mix*. Pada *cold mix*, agregat tidak perlu dipanaskan, namun aspal harus diubah menjadi aspal emulsi atau *foamed bitumen* agar mampu mengikat agregat dalam keadaan dingin. Inti kesuksesan pencampuran aspal dingin adalah kekuatan dan kecepatan agitator mixer dan properties binder. Untuk *cold mix*, pencampuran dapat dilakukan *on site* dengan menggunakan *milling machine*, atau dilakukan di *plant*. Pada umumnya sistem pencampuran dingin digunakan untuk mencampur bahan daur ulang dalam rangka pengerjaan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

PROSES PEMADATAN BAHAN PERKERASAN

Konsep Pemadatan

Untuk dapat memikul beban tertentu, suatu material perkerasan harus mempunyai kekuatan (*strength*) atau modulus tertentu. Dan untuk mencapai kekuatan tertentu tersebut, material yang merupakan campuran antara agregat dan aspal (untuk lapis permukaan lentur) harus mempunyai kepadatan (*density*) sesuai persyaratan atau spesifikasi yang telah ditentukan. Oleh karenanya Vazirani and Chandola (1978) menjelaskan bahwa sebuah proses pemadatan sangat diperlukan dalam membuat bahan perkerasan jalan agar suatu material tersebut mempunyai kepadatan dan daya dukung cukup dalam memikul beban. Semmelink (1995) juga menjelaskan bahwa bila suatu material perkerasan tidak dipadatkan secara optimal saat pelaksanaan konstruksi, maka material ini akan terpadatkan oleh beban lalu lintas sehingga terjadilah bahaya '*rutting*' atau '*permanent deformation*' (lendutan permanen). Lebih jauh Airey (2000) menambahkan bahwa untuk suatu campuran aspal, proses pemadatan sangat berpengaruh terhadap komposisi volumetrik campuran yaitu proporsi antara besaran *void in the mix* (VIM), *void in mix aggregate* (VMA) dan kadar aspal

yang mana parameter-parameter ini sangat berpengaruh terhadap performa campuran dalam melayani beban lalu lintas.

Pemadatan adalah suatu proses yang mana partikel-partikel solid dirapatkan secara mekanis sehingga volume rongga dalam campuran mengecil dan kepadatan campuran meningkat (lihat Head, 1980). Crispino dkk. (2007) menambahkan bahwa salah satu tujuan penting proses pemadatan adalah untuk pengaturan distribusi partikel agregat dalam campuran sehingga menghasilkan konfigurasi agregat optimum dalam mencapai kepadatan yang ditargetkan.

Gudimettla dkk. (2003) sependapat bahwa kemudahan material campuran perkerasan dipadatkan bukan hanya dipengaruhi oleh properties campuran yaitu suhu campuran, properties agregat dan properties aspal, namun juga oleh alat pemadat yang digunakan. Secara otomatis, parameter properties campuran dan alat pemadat juga akan berpengaruh terhadap kepadatan campuran yang dihasilkan.

Secara umum ada dua jenis alat pemadat yaitu jenis statik dan dinamik. Alat pemadat statik menggunakan berat beban mati untuk memberikan efek pemadatan. Efek pemadat jenis ini akan berkurang bila tebal lapisan material bertambah, dan efektifitasnya dapat ditingkatkan dengan cara menambah berat bebannya. Sedangkan alat pemadat dinamik menggunakan kombinasi efek berat beban dan getaran terhadap material yang dipadatkan. Efek getaran dapat mereduksi gaya gesek internal (*internal friction*) antar agregat sehingga partikel-partikel agregat akan lebih mudah bergerak mengisi rongga yang ada menuju posisi yang lebih padat.

Proses Pemadatan di Lapangan

Tahapan proses pemadatan di lapangan dapat dikategorikan dalam tiga tahap sebagai berikut:

1. *Break down Rolling*

Alat yang di gunakan adalah *Three Wheel Roller* (roda baja), dengan berat 6 - 9 ton, jumlah passing kurang lebih 4 passing, kecepatan *roller* 4 km/jam serta temperatur pemadatan 110⁰ - 125⁰C. *Break down rolling* merupakan tahap penting dalam proses pemadatan untuk mendapatkan stabilitas perkerasan maximum.

2. *Intermediate Rolling*

Dalam pekerjaan ini menggunakan alat *Pneumatic Tire roller* (roda karet) dengan berat 10-13ton, jumlah passing adalah 16 passing, tekanan ban 70-80 psi, kecepatan *roller* 6 km/jam dengan temperatur pemadatan 95⁰-110⁰C.

3. *Finishing Rolling*

Pemadatan akhir berguna untuk menghilangkan alur roda *Pneumatic Tire roller* supaya permukaan jalan halus. Alat yang digunakan yaitu *Three Wheel Roller* (roda baja), dengan berat 6 - 9 ton, jumlah passing adalah 4 - 6 passing, kecepatan *roller* 4 km/jam serta temperatur pemadatan 80⁰ - 95⁰C.

Pemadatan di Laboratorium

Alat pemadat di laboratorium sangat beragam, misal Marshall hammer, kneading compactor, Gyrotory compactor, roller slab, vibratory compactor, sistem press, dan lain lain. Berikut disampaikan tiga jenis alat pemadat.

1. *Marshall Hammer*

Marshall Hammer digunakan sebagai alat penumbuk dalam pembuatan benda uji yang akan diuji dengan alat Marshall. Cara pemadatan menggunakan *Marshall hammer* adalah sebagai berikut:

- a. Campuran aspal panas dimasukan ke cetakan (mold), kemudian ditusuk-tusuk dengan spatula (pisau) sebanyak 10 kali di tengah, 15 kali di sekeliling cetakan (mold)
- b. Bagian atas dan bawah ditumbuk dengan *Marshall hammer* dengan berat 10 lbs (4,5 kg) tinggi jatuh 18" (45,7 cm), jumlah tumbukan menyesuaikan jenis campuran aspal.
- c. Dinginkan pada suhu ruang (+ kipas angin)
- d. Keluarkan campuran aspal yang sudah padat dengan alat *Ejector*.
- e. Benda uji siap diuji *Marshall*

2. *Kneading Compactor*

Alat ini menggunakan tekanan dengan sistim hidrolik. Campuran aspal yang akan diuji di masukan ke *moll* dalam keadaan masih panas, kemudian diberi penutup dan ditaruh pada dudukan *Kneading Compactor*, kemudian ditekan. Unit hidrolik pada *Kneading Compactor* dapat di setel tekanannya sampai 11,1 kN. Untuk mendapatkan hasil yang baik pada dudukan dapat diputar 6° - 72° agar kepadatan merata.

3. *Gyratory compactor*

Gyratory Compactor digunakan sebagai alat pemadat campuran beraspal. Campuran aspal panas yang akan di uji dimasukan ke dalam cetakan kemudian di letakkan pada dudukan lalu ditekan dengan regulator. Alat ini menggunakan sistem hidrolik yang dapat distel tekanannya. Pada saat alat pemadat menekan campuran aspal, cetakan juga diputar dengan sudut tertentu agar mendapat kepadatan yang sempurna.

2. METODE PENELITIAN

Metode rekayasa dipisahkan dalam tiga tahap. Tahap pertama, kajian literatur terhadap pengembangan alat terkait. Tahap kedua, penyusunan desain dan gambar kerja. Tahap ketiga, proses manufaktur dan penyusunan manual penggunaan alat. Pada penelitian ini, rekayasa AMCA baru sampai pada tahap kedua, sedangkan rekayasa APRS sudah pada tahap ketiga, dan bahkan sudah digunakan untuk berbagai penelitian tentang karakteristik kepadatan, dan studi properties campuran beraspal.

Pada proses rekayasa AMCA, desain alat dikembangkan berdasarkan hasil pengamatan mekanisme kerja AMP, kajian literatur alat-alat laboratorium yang telah dikembangkan, pengamatan cara pencampuran yang saat ini dilakukan di beberapa laboratorium, dan diskusi dengan pakar permesinan.

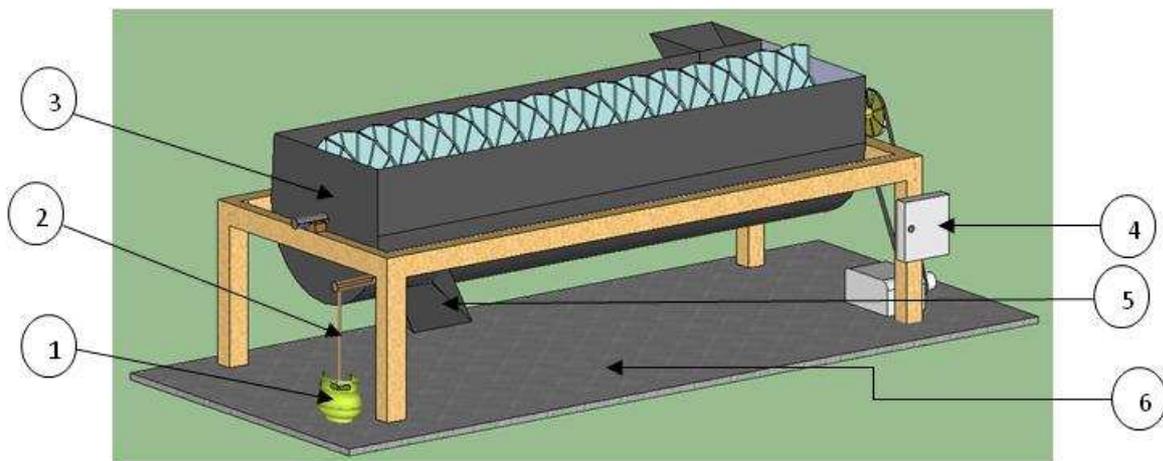
APRS didesain berdasarkan hasil pengamatan proses pemadatan di lapangan, dan kajian literatur alat-alat pemadat. Konsep alat pemadat yang baik kemudian dirumuskan, sebelum mengembangkan beberapa alternatif jenis alat pemadat.

REKAYASA ALAT MIXER CAMPURAN ASPAL (AMCA)

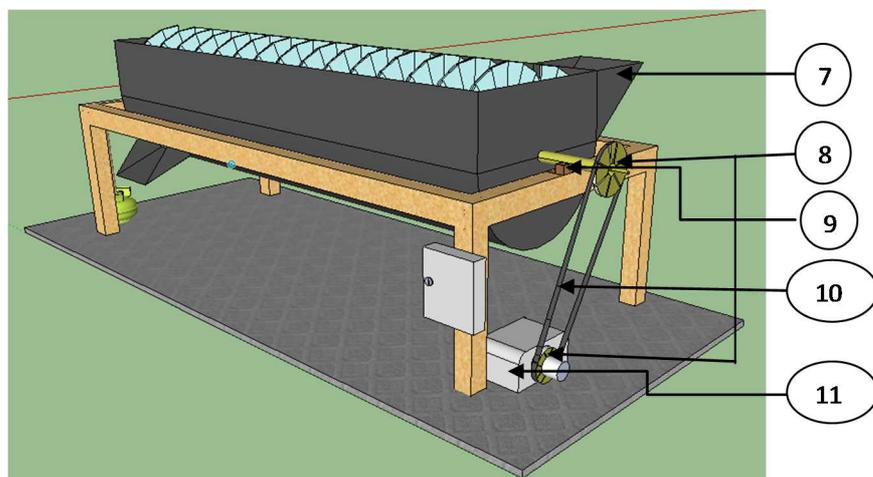
AMCA didesain untuk menggantikan alat manual penggorengan bahan perkerasan yang masih menggunakan wajan. Alat ini dikembangkan dengan tujuan agar campuran lebih homogen dan suhu pencampuran dapat dikontrol dengan baik. Alat pencampur ini di rancang bersifat *mobile* agar mudah dapat dipindahkan ke tempat lain sesuai kebutuhan. Desain AMCA yang berkapasitas 50 kg ini dapat dilihat pada Gambar 1a, b, dan c.

Sistem pemanasan alat ini menggunakan tabung elpiji. Selang, tabung, dan regulator didesain aman agar selama penggunaan tidak membahayakan bagi operator. Wajan pencampuran berbentuk setengah silinder yang dapat terbuat dari bahan aluminium, atau drum bekas aspal. *Power Panel Box* digunakan untuk mengoperasikan alat penggerak (*Gearbox CW/CCW*) saat posisi digerakan maju maupun mundur pada *screw* agitator. *Screw* yang berdiameter 70 cm ini berputar selama alat dioperasikan agar bahan campuran dapat dicampur hingga homogeny. AMCA dilengkapi dengan inlet dan outlet material yang berfungsi untuk pintu memasukkan bahan yang akan dicampur, dan untuk pintu mengeluarkan bahan setelah proses pencampuran selesai.

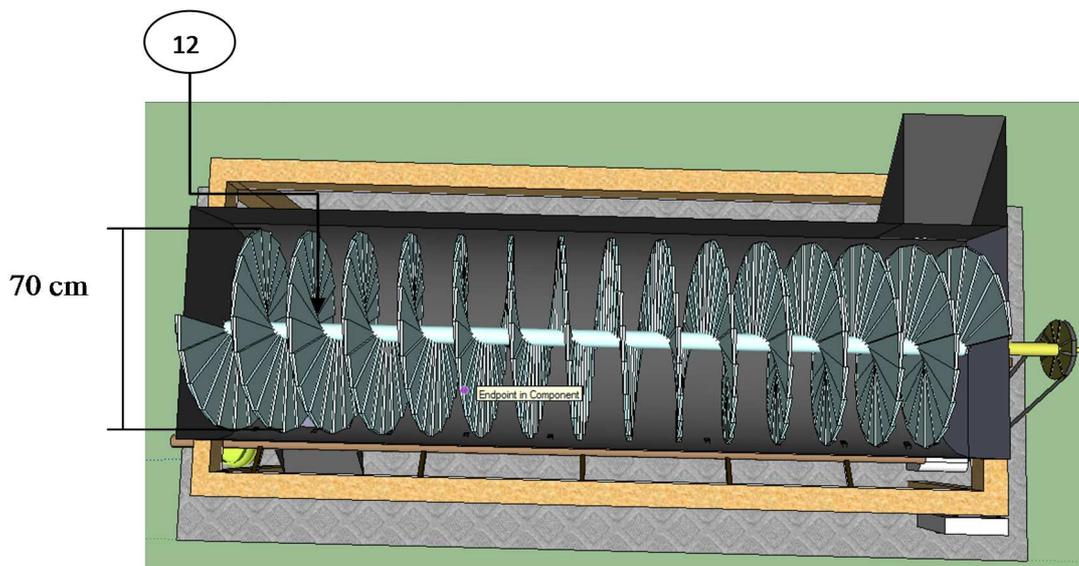
Alat ini menggunakan dua buah *Pulley* atau roda yang berfungsi memutar suatu benda. *Pulley* yang terletak diatas, berfungsi memutar batang *as* yang digerakan melalui rantai/*chain* oleh *gearbox*. Sedangkan *Pulley* yang terletak dibawah, digerakan oleh *gearbox* berfungsi menggerakkan rantai/*chain* untuk memutar *pulley* yang ada diatasnya. Pada proses diatas *Screw* dapat berputar dan melakukan proses pencampuran didalam drum. Untuk mengurangi efek goncangan maka ditambahkan *V-Block* yang berfungsi sebagai pemisah antara alat yang diam dengan yang bergerak pada saat *pulley* memutar *as screw*. Untuk keamanan dan kerapian, alat ini juga dilandasi dengan baseplate dan roda. Ukuran alat sekitar 75/150 cm.



Gambar 1a. Desain AMCA



Gambar 1b. Desain AMCA



Gambar 1c. Desain AMCA

Keterangan :

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Gasoline/ BBM | 7. Inlet material |
| 2. Selang pembakaran | 8. Pulley |
| 3. Drum | 9. V Block |
| 4. Power Panel Box | 10. Rantai/Chain |
| 5. Outlet Material | 11. Gearbox CW/CCW |
| 6. Baseplate | 12. Screw |

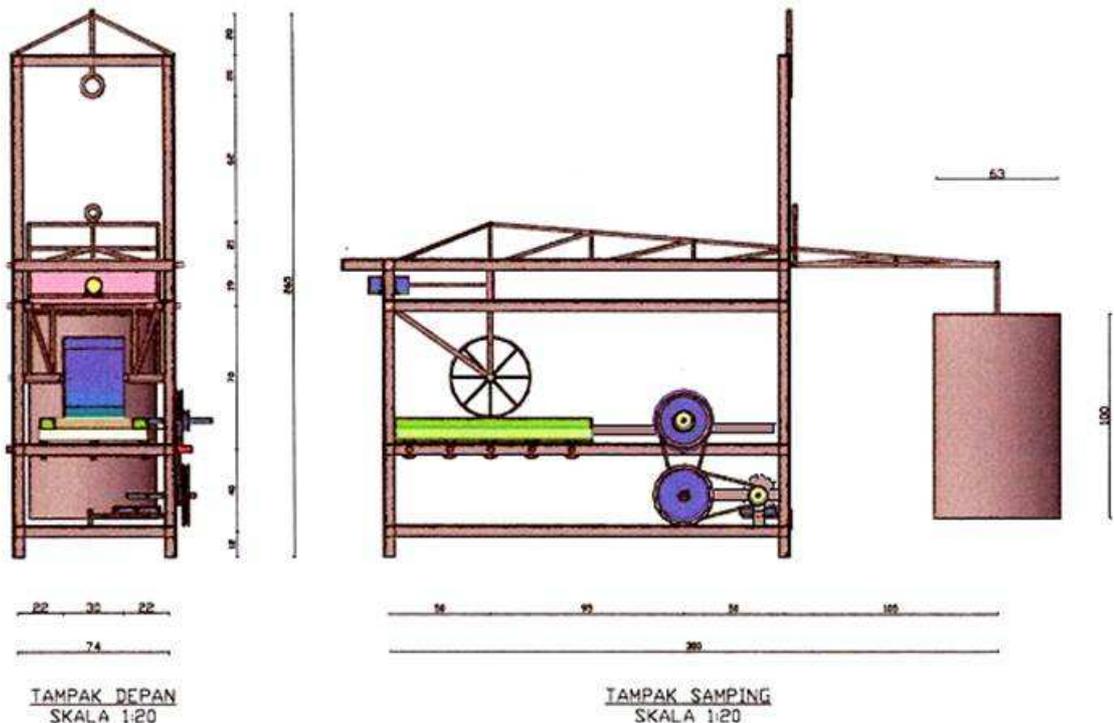
REKAYASA ALAT PEMADAT ROLLER SLAB (APRS)

Desain APRS

Pada tahap awal telah dianalisis energy yang diterima oleh material pada pemadatan menggunakan Marshall hammer dan *three wheel roller*. Energi potensial Marshall hammer untuk 2x75 tumbukan adalah 52,81 joule/cm³, sedangkan energy kinetik alat pemadat di lapangan adalah 38,58 joule per cm lebar roda (untuk *three wheel roller* roda baja kecepatan 4 kpj) dan 13,72 joule per cm lebar roda (untuk *Pneumatic Tire roller* kecepatan 2,5 kpj). Bila pemadatan di lapangan sebanyak 6 lintasan TWR dan 4 lintasan PTR, maka total energy adalah sekitar 300,08 joule (tiap cm lebar). Bila angka ini dikonversi ke satuan kg per detik per m³ maka energy total diperkirakan 7599,75 kg selama satu detik setiap m³. Analisis ini masih perlu didalami lagi terutama makna besaran energy potensial dan kinetik yang terkait dengan tinggi jatuh dan kecepatan beban.

Berdasarkan analisis diatas maka didesain APRS dengan beban roda 1875 kg (Gambar 2). Ukuran roda baja (A) jari-jari 25 cm dan lebar 30cm. Jika membutuhkan energi 7599,75 kg/cm.dtk untuk setiap cm lebarnya, maka pemadatan dilakukan dengan kecepatan 4 kpj sebanyak 14 lintasan. Pada APRS ini, pada saat operasional, yang bergerak adalah cetakan material sedangkan roda tetap ditempat.

Komponen utama APRS adalah roda baja yang diberi beban menggunakan ungkit portal dan beban pada bagian ujung portal. Komponen utama ini dibangun dalam rumah rangka baja yang kokoh dan bersifat *mobile*. Cetakan sampel disebut bak kerja yang degerakkan dengan motor penggerak yang dapat bergerak otomatis maju dan mundur.



Gambar 2. Desain Alat Pemadat Roller Slab (APRS)

Manufaktur APRS

APRS dimanufaktur di laboratorium Jalan Raya UMS selama dua bulan (Gambar 3). Kendala yang dihadapi adalah normalisasi gerakan bolak balik cetakan, dan hasil proses pemadatan. Landasan cetakan dan lengketnya material di permukaan roda juga merupakan kendala lain yang dihadapi. Pada proses manufaktur, pada saat mengeluarkan sampel memerlukan ekstruder karena berat sampel mencapai 50 kg. Pada percobaan awal, hasil sampel pemadatan masih belum sempurna bentuknya karena pemberian energi roda ke material belum merata. Bila dikehendaki bentuk sampel yang lebih sempurna maka direkomendasikan ukuran sampel adalah 30cm x 30cm.



Gambar 3. Hasil Manufaktur APRS



Gambar 4. Trial Awal APRS

Gambar 4 adalah penjelasan hasil trial APRS pada fase awal. Agregat dengan berat 42 kg dicampur secara panas dengan aspal 6%. Suhu pencampuran adalah 180°C. Campuran dipadatkan pada suhu 110°C. Pemadatan dilakukan dengan tambahan beban pemadat 70 kg dan jumlah lintasan 55 kali. Bentuk sampel relative rata dibanding dengan trial sebelumnya, namun masih terlihat retak arah melebar. Berdasarkan 10 benda uji hasil core drill, nilai VITM terkecil adalah 23% dan nilai terbesar adalah 27%. VITM adalah void in the mix yang menunjukkan prosentasi rongga udara dalam campuran. Nilai ini menunjukkan bahwa kepadatan campuran masih sangat rendah, namun sudah menunjukkan distribusi yang cukup merata.

4. KESIMPULAN

1. Alhamdulillah berdasarkan hasil pembahasan, maka telah dihasilkan dua rekayasa alat di Laboratorium Jalan Raya UMS, yaitu alat *mixer* campuran beraspal (AMCA) dan alat pemadat *roller slab* (APRS).
2. Rekayasa AMCA masih dalam tahap desain. Desain AMCA menggunakan bahan drum, dan agitator baja, sehingga dapat mengaduk sekitar maksimal 50 kg campuran aspal. Bahan campuran dimasukkan melalui inlet di bagian samping, dan dituangkan melalui outlet di bagian bawah drum. AMCA didesain dengan dilengkapi alat thermometer.
3. APRS didesain dengan menggunakan beban penggilas roller baja, dan dapat memadatkan bahan campuran sekitar 40 kg. Cetakan benda uji berukuran lebar 30cm panjang 100cm dan tinggi 7cm. APRS sudah dilengkapi alat ekstruder untuk mengeluarkan sampel dari cetakan. Benda uji didapatkan dengan cara melakukan core drill pada sampel yang telah dipadatkan.
4. APRS telah dimanufaktur sesuai dengan desainnya. Berdasarkan hasil trial pada fase awal, dihasilkan bentuk sampel relatif rata, namun masih terlihat retak arah melebar. Berdasarkan evaluasi nilai prosentasi rongga udara dalam campuran, kepadatan campuran masih sangat rendah, namun sudah menunjukkan distribusi yang cukup merata

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memanjatkan puja dan puji syukur ke hadirat Allah subhanahu wa taala atas segala kemudahan yang telah diberikan kepada tim dalam melaksanakan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UMS

dan Laboratorium Jalan Raya UMS yang telah membantu pembiayaan dan penyelenggaraan penelitian. Penulis juga sangat berterima kasih kepada Bapak Muslich Hartadi Sutanto, PhD., Bapak Agus Riyanto, MT., Ibu Senja Rum Harnaeni, MT., dan Ibu Renaningsih, MT. atas berbagai masukan yang sangat konstruktif.

DAFTAR PUSTAKA

- Airey, G.D., 2000. *Introduction to Bituminous Materials*. In the Residential Course on Bituminous Pavements, Materials, Design and Evaluation. Lecture Notes, University of Nottingham, School of Civil Engineering. 3rd-7th April 2000.
- Aris, 2010, *Alat Pemadat Roller Slab (APRS)*, Tugas Akhir, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Crispino, M., Rampini, R. and Pozzi, M., 2007. *An Experimental Analysis of the Effect of Compaction on Asphalt Pavement Macrotecture*. Balkema- Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Sciences, Advance Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials – Loizos, Scarpas & Al-Qadi (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44882-6.
- Gudimettla, G. M., Cooley, L.A. and Brown, E.R., 2003. *Workability of Hot Mix Asphalt*. National Centre for Asphalt Technology, NCAT Report 03 – 03, Auburn University, 277 Technology Parkway, Auburn, AL 36830.
- Head, K.H., 1980. *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests*. Pentech Press Limited, Estover Road, Plymouth, Devon, ISBN 0 7273 1304 5.
- Semmelink, C. J., 1995. *Optimal Compaction of Untreated Road Building Materials in South Africa*. Unbound Aggregates in Roads (UNBAR4), edited by Andrew Dawson and Ron Jones. The Department of Civil Engineering, The University of Nottingham.
- Sunarjono, S., Sudjatmiko, A., Sutanto, M., H., dan Renaningsih. 2012. *Studi Mekanika Aspal, Mekanika Tanah Dan Rekayasa Alat Untuk Bahan Perkerasan Jalan (Disertai Pemberdayaan Riset Grup)*. Laporan Akhir Penelitian Tahap Tahun II, Penelitian Insentif Pemberdayaan Riset Unggulan (Pinpru), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Vazirani, V. N. and Chandola, S. P., 1978. *Highway and Soil Engineering*. Khanna Publishers, 2-B Nath Market, Nai Sarak Delhi 110006, pp.125-133.