

Aplikasi Teknik *Computed Tomography (CT) Scan* dalam Penelitian Porositas Tanah dan Perkembangan Akar

The Use of Computed Tomography (CT) Scan Technique to Study Soil Porosity and Root Development

Achmad Rachman

Balai Penelitian Tanah, Jl. Tentara Pelajar No. 12, Cimanggu, Bogor 16114. Email: arbb1@yahoo.com

Diterima 23 Oktober 2015; Direview 26 Nopember 2015; Disetujui dimuat 11 Desember 2015

Abstrak: Perkembangan akar dan laju pergerakan air di dalam profil tanah sangat dipengaruhi oleh bentuk, ukuran, dan orientasi dari pori tanah. Tingginya variabilitas pori tanah, baik pada skala keruangan (*spatial*) maupun waktu (*temporal*), membutuhkan teknik pengukuran yang cepat dan dapat dilakukan berulang kali tanpa merusak obyek penelitian agar dihasilkan rekomendasi pengelolaan yang lebih tepat. Penggunaan *X-ray computed tomography (CT) scan*, yang digunakan dalam dunia kedokteran untuk mendiagnose penyakit pasien, dapat digunakan secara cepat dan akurat untuk mengkuantifikasi porositas dan sifat-sifat tanah lainnya serta perkembangan perakaran di dalam tanah. Kelebihan teknik *CT scan* dibanding teknik sebelumnya seperti kurva karakteristik air dan teknik irisan tipis adalah dapat mengkuantifikasi jumlah pori, pola distribusi keruangan, dimensi fraktal, dan bentuk pori dari gambar 3 dimensi (3-D) beresolusi tinggi yang dihasilkan. Makalah ini bertujuan untuk mereview penggunaan *CT Scan* dalam penelitian porositas tanah dan perakaran untuk mendapatkan pemahaman yang lebih detil tentang interaksi antara tanah dan akar. Dengan pemahaman yang lebih detil tersebut dapat ditentukan teknik pengelolaan tanah dan tanaman yang lebih baik untuk meningkatkan produktivitas pertanian.

Kata kunci: *Computed Tomography (CT) Scan / Porositas Tanah / Perkembangan Akar / Teknik Analisis*

Abstract: Root development and water movement in the soil profile are highly affected by the shape, size and orientation of the soil pores. The high spatial and temporal variability of soil porosity required a quick and repeated non-destructive technique to measure it in order to develop a more suitable land management recommendation. The use of computed tomography (CT) scan, which has been used for years in medical examination of patient, can be utilized in quantifying rapidly and accurately soil porosity and other soil characteristics as well as root development in the soil sample. The advantage of CT scan technique over other techniques such as soil water characteristic curve and thin section is the possibility to quantify the amount, spatial distribution, fractal dimension, and shape of the soil pores from 3-D high resolution image produced. The aim of this review is to offer a perspective on the possible application of CT scan technique in soil porosity and root studies to obtain more detail understanding of soil and root interactions. With that understanding, one can develop more accurate soil and crop management to improve agriculture productivity.

Keywords: *Computed Tomography (CT) Scan / Soil Porosity / Root Development / Technical Analysis*

PENDAHULUAN

Pori tanah berperan sangat penting sebagai media pergerakan air di dalam tanah (Edwards *et al.* 1988, Heard *et al.* 1988, Allaire-Leung *et al.* 2000, Rachman *et al.* 2004). Tanah yang mempunyai pori berukuran makro ($>1.000 \mu\text{m}$) relatif banyak akan mempermudah bagi akar tanaman, udara, dan air untuk melakukan penetrasi ke dalam tanah. Pergerakan air di dalam tanah yang mempunyai pori berukuran makro akan didominasi oleh pergerakan melalui pori makro tersebut, khususnya pada kondisi mendekati jenuh air di permukaan tanah. Secara alami, air bergerak mengikuti jalur yang kurang resistensinya,

dalam hal ini pori makro. Sebaliknya, pada tanah yang tidak terdapat pori makro, air bergerak melalui pori berukuran mikro ($<10 \mu\text{m}$) atau ruang-ruang di antara butir-butir atau agregat tanah (Warner *et al.* 1989). Laju pergerakan air di dalam tanah dan retensi tanah terhadap pergerakan air tersebut sangat dipengaruhi oleh bentuk, ukuran, dan orientasi dari pori tanah (Rasiah and Aylmore 1998).

Metode yang umum digunakan dalam mengukur porositas tanah adalah dengan memprediksinya dari kurva karakteristik air tanah, tensiometer, dan bobot isi tanah (Jury *et al.* 1991, Everts and Kanwar 1993). Perhitungan porositas tanah dari kurva karakteristik air

tanah didasarkan pada prinsip kapilaritas yang menyatakan bahwa pada suatu nilai potensial matriks air tanah tertentu, hanya pori-pori dengan ukuran sama dengan atau lebih kecil diameter tertentu yang terisi air. Perhitungan porositas dengan metode tersebut hanya dapat menentukan distribusi ukuran pori dan volume total pori (Beven and Gremann 1982), namun tidak dapat menentukan secara spesifik lokasi, ukuran dan pola keruangan (*spatial distribution*) pori di dalam tanah (Gantzer and Anderson 2002).

Sebagaimana sistem lain yang terbentuk secara alami, atribut-atribut tanah seperti porositas, agregasi dan kelembaban sangat bervariasi tingkatannya baik secara horizontal maupun vertikal. Oleh karena itu, upaya untuk memahami perilaku tanah secara utuh hanya dapat dilakukan dengan mengetahui karakteristik dari masing-masing atribut tanah. Pemahaman tersebut penting dalam rangka menerapkan teknologi yang tepat dalam pengelolaannya sehingga sumberdaya tanah dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya dan berkelanjutan (*sustainable*). *X-ray computed tomography (CT) scan*, yang digunakan dalam dunia kedokteran untuk mendiagnose penyakit pasien dapat menjawab tantangan tersebut.

Penggunaan teknik *CT scan* dalam penelitian tanah pertama kali dilaporkan oleh Petrovic *et al.* (1982) yang membuktikan adanya hubungan linear antara hasil dari *CT scan* dengan berat jenis tanah (BD). Setelah dipublikasikannya hasil penelitian Petrovic *et al.* (1982), penggunaan *CT scan* untuk mengkuantifikasi sebaran pori tanah, agregat tanah dan kelembaban tanah telah banyak dilakukan dan menunjukkan hasil yang sangat baik (Anderson *et al.* 1988, Warner *et al.* 1989; Anderson *et al.* 1990, Rasiyah and Aylmore 1998, Perret *et al.* 1999; Rachman *et al.* 2005). Makalah ini bertujuan untuk mereview beberapa penelitian fisika tanah yang menggunakan *CT scan*. Metode *CT scan* ini dapat secara tepat mendeteksi pori tanah dan kerapatannya termasuk juga mengkuantifikasi diameter pori sampai pada ukuran sekecil 0,15 mm (Gantzer and Anderson 2002).

OVERVIEW MEKANISME KERJA CT SCAN

Sinar X (*X-rays*) dikembangkan sebagai alat bantu dalam dunia kedokteran untuk mendiagnose penyakit pasien. Kelebihan utama dari teknik ini adalah kemampuannya memperlihatkan bagian dalam dari

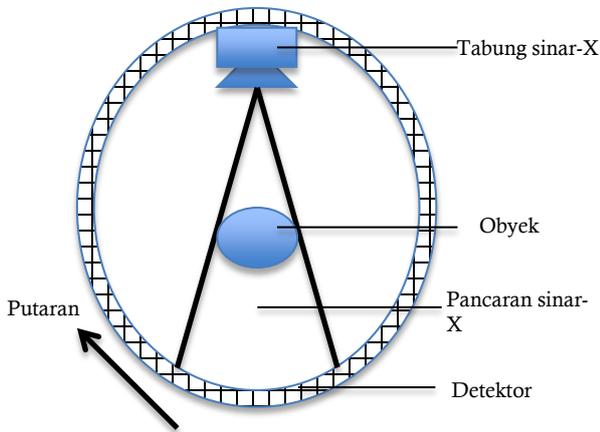
suatu obyek tanpa menimbulkan kerusakan fisik pada obyek yang sedang diteliti (*non-destructive technique*). Teknologi X-rays ditemukan oleh Wilhelm Conrad Roentgen pada tahun 1895. Dari penelitian yang dilakukannya di laboratorium, Roentgen menemukan adanya radiasi misterius yang dapat melakukan penetrasi ke dalam tubuh dan menghasilkan gambar tulang. Setelah melakukan uji coba ke tangan istrinya, Roentgen kemudian mengumumkan penemuannya pada tanggal 28 Desember 1895 (Assmus 1995). Temuan ini digunakan secara luas dalam dunia kedokteran yang dikenal sebagai teknik Roentgen hingga saat ini.

Teknik yang lebih canggih dari teknik Roentgen ditemukan dan dikembangkan oleh Godfrey Hounsfield (Hounsfield 1973) yang kemudian dikenal sebagai CT (*computed tomography*) scan. Dasar pemikiran dari temuannya adalah bahwa suatu benda yang disimpan dalam kotak tertutup dapat diketahui bentuknya tanpa merusak kotaknya dengan melakukan pembacaan x-ray dari berbagai sudut dari benda tersebut. Sebagai seorang ahli komputer dan radar, dia kemudian menciptakan aplikasi yang dapat menggabungkan gambar x-rays yang diambil dari berbagai sudut untuk menghasilkan gambar dari obyek dalam bentuk irisan (*slices*).

Secara umum *CT scan* terdiri atas empat perangkat alat utama yaitu sumber radiasi, sistem deteksi (detektor), manipulator mekanis dan komputer beserta monitor. Sumber radiasi berfungsi untuk melepaskan radiasi ke obyek yang kemudian ditangkap oleh detektor, sumber radiasi dan detektor berputar mengelilingi obyek selama proses *scanning* berlangsung. Manipulator mekanis berfungsi untuk menentukan geometri gerak scanner yang tergantung "generasi" *CT scan*. Komputer berfungsi untuk mengolah data yang kemudian ditayangkan pada monitor sehingga diperoleh gambar irisan atau penampang 2 dimensi (2-D) atau peta distribusi internal 3 dimensi (3-D) obyek yang discan.

Cara kerja *CT scan* mirip dengan perangkat radiografi lainnya yaitu keduanya menggunakan intensitas radiasi terusan setelah melewati suatu obyek untuk membentuk citra atau gambar. Perbedaan mendasar dari kedua perangkat ini adalah pada teknik yang digunakan untuk memperoleh citra dan pada citra yang dihasilkan. Konvensional X-ray menampakan obyek hanya dari satu sisi saja dan gambar yang

dihasilkan seperti sebuah bayangan yang terekam pada sebuah film. Pada teknik CT, tabung X-ray dan sistim deteksi berputar mengelilingi obyek yang di-scan (Gambar 1).



Gambar 1. Gambar skematik cara kerja *CT Scan* generasi keempat

Figure 1. Schematic diagram showing work mechanism of the 4th generation of *CT Scan*

Sumber radiasi yang berputar mengelilingi obyek akan melepaskan sinar yang kemudian melewati/ menembus obyek. Detektor yang juga berputar mengelilingi obyek, mengukur intensitas dari sinar X yang telah melewati obyek. Komputer kemudian menghitung nilai dari koefisien atenuasi linear obyek (μ) sebagai fungsi dari posisi di dalam penampang lintang obyek. Dengan cara tersebut, informasi penampang melintang obyek akan diperoleh dari banyak sudut proyeksi. Dari informasi tersebut, penampang melintang obyek dalam bentuk 3-D kemudian direkonstruksi.

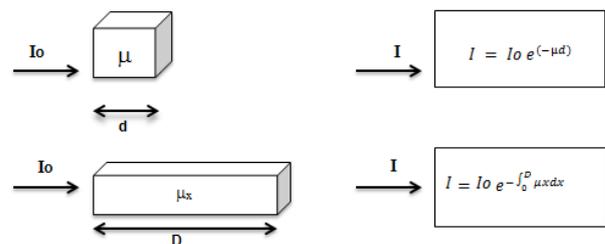
Obyek yang direkonstruksi terdiri atas 3 dimensi elemen volume (*three-dimensional volume elements*) atau disingkat *voxels*. Informasi citra yang dihasilkan dari *CT scan* terdiri atas kumpulan 2 dimensi angka (*two dimensional array of numbers*) yang sering disebut sebagai “Angka CT”. “Angka CT” ini dapat ditampilkan dalam bentuk print out angka di atas kertas, citra keabuan (*greyscale*) maupun berwarna. Sebuah citra CT terbentuk dari *picture elements* atau disingkat *pixels*; pada saat ini *medical CT scanner* (MCT) umumnya mempunyai pixels 512 x 512 dengan ketebalan “irisannya” mencapai 0,5 mm. *CT scanner* yang lebih tinggi resolusinya atau disebut juga *ultra-high resolution CT scanner* (UHCT), ketebalan

irisannya mencapai 0,097 mm. Dengan demikian citra yang dihasilkan oleh *CT scanner* dapat dilihat sebagai peta distribusi keruangan internal obyek dalam tiga dimensi yang memudahkan dalam menganalisa sebaran struktur internal obyek.

Sinar X yang melewati suatu obyek akan mengalami atenuasi/perubahan arah (*attenuated*). Derajat atenuasi sangat tergantung pada densitas dan nomor atom dari obyek yang di-scan. Untuk *monoenergetic X-rays* yang melewati sebuah obyek yang tebalnya d dapat dijelaskan berdasarkan hukum Beer (*Beer’s Law*) dengan rumus sebagai berikut:

$$I = I_0 e^{-(\mu_E d)} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana I adalah intensitas radiasi yang telah mengalami atenuasi, I_0 adalah intensitas radiasi awal, μ adalah koefisien atenuasi linier (*linear attenuation coefficient*) sebagai fungsi dari μ obyek, nomor atom dan energi radiasi (E) dan d adalah tebal obyek (Denison *et al.* 1997). Dari persamaan (1) dapat dilihat bahwa makin besar d atau μ , maka akan menghasilkan nilai I yang makin kecil atau telah terjadi atenuasi yang semakin besar (Gambar 2).



Gambar 2. Hubungan antara intensitas radiasi yang telah mengalami atenuasi dengan ketebalan obyek

Figure 2. Correlation between attenuated radiation and thickness of object

Persamaan (1) berlaku untuk obyek yang homogen dengan densitas yang seragam. Untuk obyek yang heterogen seperti tubuh manusia atau contoh tanah, Persamaan (1) perlu di integralkan sehingga menjadi sebagai berikut:

$$I = I_0 e^{[-\int \mu(x) dx]} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana $\mu(x)$ adalah koefisien linier atenuasi sebagai fungsi dari jarak, x , dari sumber sinar X yang nilainya antara 0 sampai dengan D , tebal dari obyek yang discan. Meskipun secara teori Persamaan (2) benar, namun belum dapat diketahui distribusi koefisien atenuasi di dalam obyek karena hanya satu sinar yang diatenuasi dan dimonitor. Dengan menggunakan CT-scan, koefisien atenuasi pada berbagai titik di dalam obyek yang di scan dapat diketahui karena adanya sejumlah sinar yang dipancarkan dan menembus obyek yang datang dari berbagai sudut (0-360°). Dengan demikian, Persamaan (2) menjadi:

$$I_{ij} = I_o e^{[-\int \mu(x,y)ds]} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana i adalah posisi detektor di *detector array*, j adalah posisi dari pusat detector array, dan s adalah jarak dari sumber radiasi yang nilainya bervariasi dari 0 sampai S . Aplikasi komputer merekonstruksi data yang terekam di fan beam menjadi beberapa profil yang kemudian pada masing-masing profil dilakukan backprojection menjadi sebuah image. Gabungan dari backprojection dari semua profil pada masing-masing poin kemudian ditampilkan dalam bentuk gambar CT. Dengan demikian, gambar CT yang diperoleh pada dasarnya adalah sebuah "peta" tentang koefisien linier atenuasi, $\mu(x,y)$.

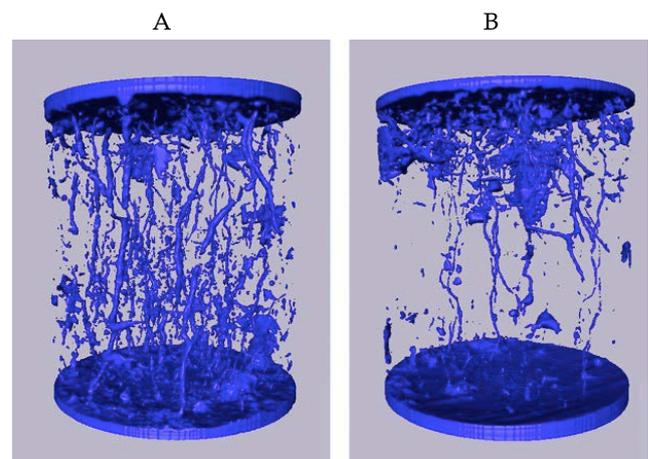
Koefisien linier atenuasi dipengaruhi oleh kepadatan obyek yang di scan (Phillips and Lannutti, 1997). Makin padat obyeknya akan menghasilkan atenuasi yang lebih besar dibanding obyek yang kepadatannya lebih kecil; dengan demikian, dua obyek yang berbeda kepadatannya akan menghasilkan gambar sinar x yang berbeda. Gambar digital yang dihasilkan dari proses *CT scan* memperlihatkan potongan melintang bagian dalam obyek, darimana material yang terekam dapat dibedakan.

APLIKASI CT SCAN DALAM PENELITIAN TANAH

Penelitian Porositas Tanah

Porositas tanah dan berat jenis tanah merupakan dua parameter tanah yang penting mempengaruhi pergerakan air di dalam tanah (Rachman *et al.* 2004). Porositas tanah, terutama pori makro, menentukan

kemampuan tanah dalam melalukan air, mensuplai oksigen ke perakaran tanaman, menyimpan air tanah, dan sebagai indikator tingkat kepadatan tanah. Selain volume total, karakteristik dari pori tanah yang sangat penting untuk diketahui diantaranya adalah diameter pori, kontinuitas dan haluan pori (vertikal atau lateral). Haluan vertikal penting untuk mengisi (*recharge*) sumber air tanah dan membuang bahan-bahan beracun dari zona perakaran tanaman, sementara haluan horizontal penting untuk mensuplai air ke akar tanaman. Variabilitas keruangan (*spatial variability*) sifat pori tanah di lapangan sangat tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Tanah yang belum mengalami pemadatan akibat penggunaan mesin-mesin pertanian menunjukkan pori makro tanah terbentuk ke arah vertikal dan horizontal sehingga air dapat bergerak vertikal kebawah dan horizontal untuk mensuplai air ke daerah perakaran tanaman, sedangkan tanah yang sudah mengalami pemadatan, pembentukan pori makro searah vertikal sangat berkurang secara nyata dan horizontal hampir tidak ada.



Sumber: Lamandé *et al.* (2013)

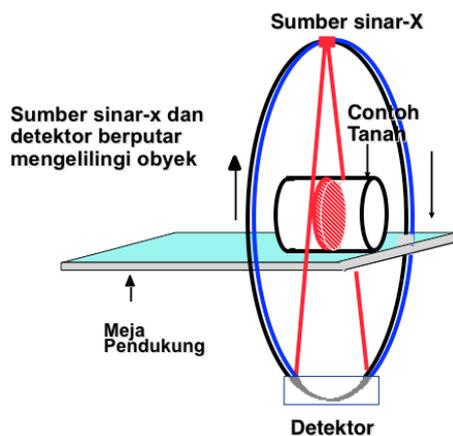
Gambar 3. Porositas tanah pada tanah yang belum mengalami pemadatan (A) dan tanah yang sudah mengalami pemadatan (B)

Figure 3. Soil porosity of non-compacted soil (A) and compacted soil (B)

Sebelum digunakannya teknik *CT scan* untuk mengukur variabilitas pori tanah, telah berkembang teknik "irisian tipis". Teknik ini dilakukan dengan terlebih dahulu mengisi pori contoh tanah dengan bahan yang mudah mengeras ketika mendingin seperti resin, sedangkan udara dan air yang sebelumnya

mengisi pori tanah akan terdesak keluar. Kemudian contoh tanah dikupas vertikal dengan tebal irisan yang tipis. Setiap irisan diambil gambarnya kemudian dianalisis menggunakan teknik analisa gambar. Prosedur ini tentu saja memerlukan waktu yang lama dan besar kemungkinan akan mengganggu struktur mikro contoh tanah.

Kemajuan yang dicapai dalam pengembangan teknologi sinar x (*x-ray*) dengan ditemukannya teknologi *CT scanner* telah memungkinkan dilakukannya penelitian sifat fisik tanah dengan cepat tanpa merusak contoh tanah dan menghasilkan gambar 3-D dari contoh tanah yang diteliti (Anderson *et al.* 1988). Penggunaan teknik *CT scan* memungkinkan diperolehnya gambar dengan resolusi yang jauh lebih baik dibanding metode sebelumnya seperti teknik “irisan tipis”. Penempatan contoh tanah dalam proses *scanning* digambarkan secara skematik pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema penempatan contoh tanah dalam proses *scanning* oleh *CT scanner*

Figure 4. Schematic diagram showing placement of soil sample for scanning by *CT scanner*

Teknik ini semakin berkembang tidak hanya mengukur berat jenis tanah, tetapi termasuk juga mineral, bahan organik, struktur, pemadatan dan biota tanah dengan tingkat kedetilan yang makin tinggi (Taina *et al.* 2007). Pada awal tahun 1980-an, ketebalan irisan yang dihasilkan oleh *CT Scanner* masih berkisar 12 mm dengan ukuran pixel (*picture element*) berdimensi 1,25 x 1,25 mm, dengan ketebalan irisan tersebut maka *CT Scanner* hanya mampu mendeteksi pori yang berukuran besar (>2-mm). Pada pertengahan tahun 2000-an, *CT scanner* sudah mampu menghasilkan tebal

irisan 0,097 mm, pixel berdimensi 0,148 x 0,148 mm sehingga menghasilkan voxel (*volume element*) 0,0021 mm³. Dengan menggunakan *CT scan* beresolusi tinggi, dimungkinkan untuk menganalisa pori berukuran sedang dan mikro (< 2 mm) dan sifat tanah lainnya.

Penggunaan *CT Scan* dalam penelitian tanah pertama kali diperkenalkan oleh Petrovic *et al.* (1982) dengan menggunakan butiran glass (*glass bead*) dan tanah yang sudah di saring untuk mensimulasikan variasi berat jenis, menemukan adanya hubungan linier antara berat jenis tanah dengan rata-rata koefisien linier atenuasi dari contoh tanah yang di scan. Mereka juga melaporkan bahwa dengan menggunakan teknik CT, lubang artifisial berdiameter 15 mm yang sengaja dibuat dan penempatan tiga buah krikil berbeda ukuran dalam contoh tanah dapat diidentifikasi dalam bentuk gambar 3 dimensi dengan resolusi keruangan (*spatial resolution*) yang baik.

Anderson *et al.* (1988) menggunakan teknik *CT Scan* untuk mengukur berat jenis dan kelembaban tanah dari dua jenis tekstur tanah yang berbeda, lempung berdebu dan liat berdebu. *CT scanner* yang digunakan adalah Philips Tomoscan 310 yang menghasilkan pixel (*picture element*) berukuran 1,25 x 1,25 mm. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya hubungan linier ($r^2 = 0,99$) antara rata-rata koefisien linier atenuasi dengan volume fraksi padatan yang berhubungan dengan berat jenis untuk kedua jenis tekstur tanah yang diteliti.

Pires *et al.* (2011) mengamati perubahan porositas tanah pada 4 lapisan kedalaman tanah akibat perlakuan pembasahan dan pengeringan yang berulang. Lapisan pertama (permukaan) sedalam 0-7 mm (A), lapisan kedua pada kedalaman 7-28 mm. Dengan menganalisa gambar yang dihasilkan dari *CT Scan* Generasi Pertama dapat dikuantifikasi perubahan porositas tanah pada masing-masing lapisan setebal 7 mm (Tabel 1). Lapisan permukaan memiliki porositas yang lebih rendah dibanding lapisan dibawahnya yang berarti lapisan permukaan lebih padat. Perlakuan pembasahan dan pengeringan sebanyak 9 kali dapat meningkatkan porositas tanah. Pemahaman tentang karakteristik pemadatan pada lapisan permukaan tanah (*soil crusting*) sangat penting dalam kaitannya dengan aliran permukaan dan perkecambahan benih. Pada tanah yang terdapat pemadatan di permukaan akan menghambat laju infiltrasi air ke dalam tanah sehingga aliran permukaan akan lebih banyak. Demikian pula terhadap perkecambahan benih yang terhambat karena adanya lapisan tersebut.

Tabel 1. Pengaruh perlakuan pembasahan dan pengeringan (W-D) yang berulang terhadap porositas tanah pada lapisan permukaan tanah yang telah memadat dan bahwa permukaan yang tidak mengalami pemadatan

Table 1. Effects of wetting and drying (W-D) cycles on soil porosities of compacted soil surface and non-compacted sub-surface soil layers

Perlakuan	Porositas tanah		
	Kontrol	W-D 3 kali	W-D 9 kali
 %		
Lapisan permukaan tanah (0-7 mm)	39 ± 2	39 ± 2	42 ± 2
Lapisan bawah permukaan (7-28 mm)	44 ± 4	44 ± 4	47 ± 5

Sumber : Pires *et al.* (2011)

Dengan menggunakan teknik yang sama, Rachman *et al.* (2005) menganalisa perubahan berat jenis tanah, jumlah pori, jumlah pori makro dan meso, dimensi fraktal (*fractal dimension*) dan bentuk pori pada perlakuan konservasi tanah menggunakan strip rumput. *CT scanner* yang digunakan adalah Siemens Somatom Plus 4 Volume Zoom. Parameter *scanner* diset pada 125 kV, 400 MA-s dan 1,5-s waktu *scan* untuk dapat menghasilkan proyeksi yang lebih de dan sedikit *noise*. *Scanner* menghasilkan pixel berdimensi 0,19 x 0,19 mm de ngan tebal “irisan” 0,5 mm, dengan demikian diperoleh voxel berukuran 0,018 mm³. Gambar yang dihasilkan, setelah diolah menggunakan aplikasi *ImageJ* (Rasband 2002), ditunjukkan pada Gambar 5.

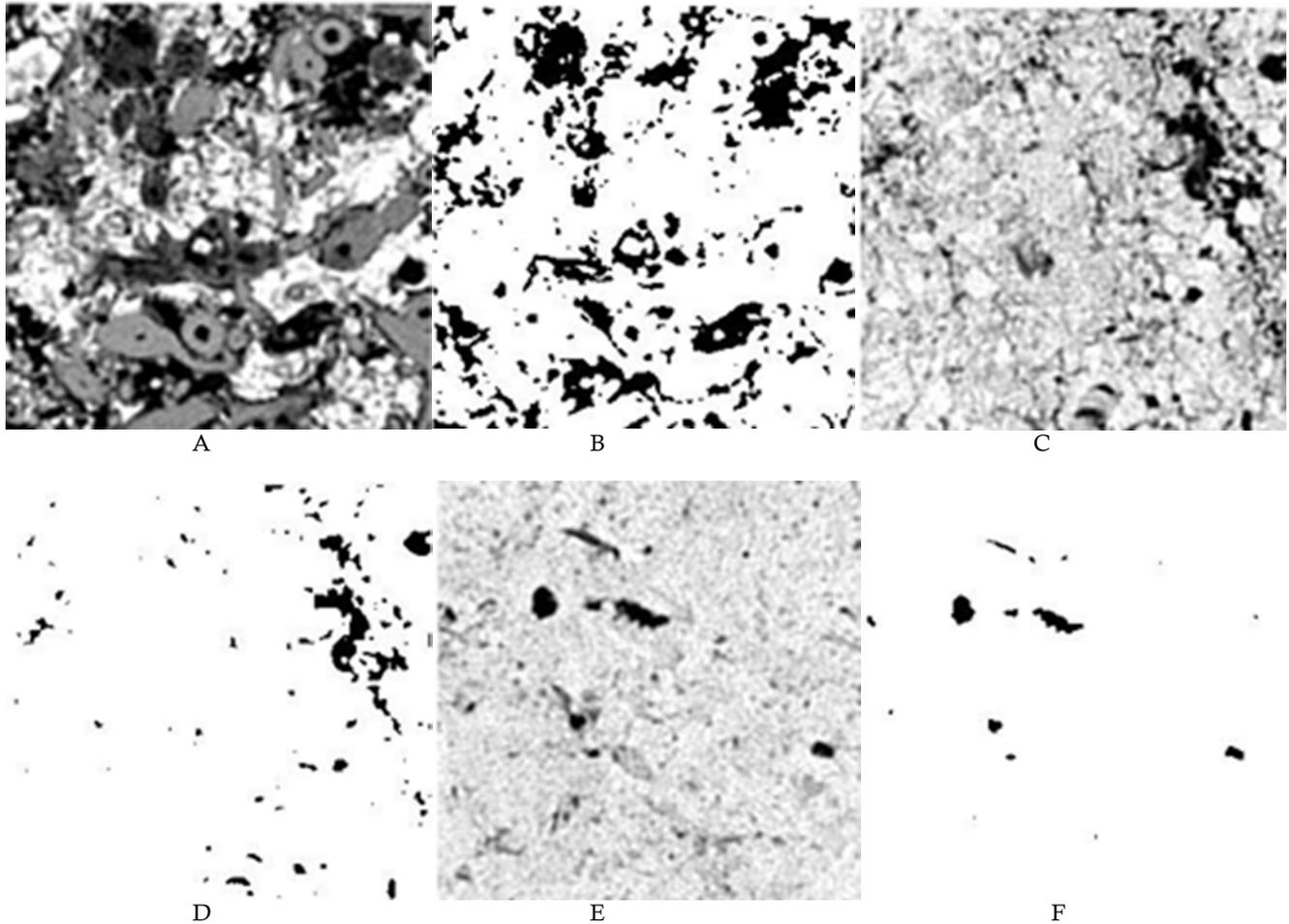
Dari Gambar 5 tersebut jelas terlihat perbedaan tingkat kepadatan tanah dimana contoh tanah yang diambil di dalam barisan strip rumput (Gambar 5A & B) lebih gembur (pori lebih banyak) dibanding contoh yang diambil dari dalam barisan pertanaman jagung (Gambar 5C & D) dan dari zona endapan sedimen (Gambar 5E & F). Pengukuran pori makro menggunakan teknik *CT scan* menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil yang diperoleh menggunakan teknik kurva karakteristik air (Tabel 2). Terdapat kecenderungan bahwa hasil penetapan pori makro menggunakan teknik kurva karakteristik air lebih besar dibanding teknik *CT scan*, namun secara statistik tidak berbeda nyata.

Kelebihan dari teknik *CT scan* dibanding teknik sebelumnya (kurva karakteristik air dan irisan tipis) adalah dimungkinkannya untuk mengkuantifikasi jumlah pori, pola distribusi keruangan, dimensi fraktal, dan bentuk pori. Dari penelitian Rachman *et al.* (2005)

diperoleh hasil dimana pada zone strip rumput terdapat rata-rata jumlah pori sebanyak 142,4 dan sebanyak 59,6 pada zona pertanaman jagung serta terkecil yaitu sebesar 28,5 pada zona endapan sedimen (Tabel 3). Pori berukuran makro (>1.000 µm) dan meso (200-1.000 µm) terbanyak dijumpai pada zona strip rumput yaitu masing-masing 0,056 m³/m³ dan 0,006 m³/m³. Untuk parameter bentuk pori, zona pertanaman jagung menghasilkan bentuk pori yang lebih membulat yang ditandai dengan rata-rata nilai *circularity* yang lebih besar (1,031) disusul oleh zona endapan sedimen (0,965) dan zona strip rumput (0,940).

Nilai *circularity* menunjukkan dimensi panjang dan besar pori secara kualitatif dari suatu perlakuan dibanding perlakuan lainnya, semakin rendah nilai *circularity* menunjukkan porositas tanah yang relatif lebih panjang dan besar (Mermut *et al.* 1992). Pada kondisi dimana porositas tanah yang relatif lebih panjang dan besar maka hantaran hidrolik tanah demikian pula laju infiltrasi akan lebih besar sehingga aliran permukaan menjadi lebih kecil.

Sementara nilai dimensi fraktal menunjukkan panjang lingkaran luar dari pori. Semakin panjang nilai dimensi fraktal, semakin besar dimensi ukuran pori yang diukur sehingga makin besar kemampuannya dalam melakukan air. Perkembangan perakaran tanaman rumput pada zona strip rumput yang lebih baik dibanding pada zona sedimentasi dan strip rumput menghasilkan porositas tanah yang lebih tinggi baik dalam jumlah, ukuran dan bentuk. Namun demikian, hasil penelitian Udawatta *et al.* (2008) menunjukkan bahwa parameter porositas tanah yang korelasinya sangat tinggi terhadap hantaran hidraulik tanah adalah jumlah pori.



Keterangan: A) zona strip rumput (*grayscale*), B) strip rumput (*binary*), C) tanaman pangan (*grayscale*), D) tanaman pangan (*binary*), E) endapan (*grayscale*), and F) endapan (*binary*).

Gambar 5. Gambar CT menunjukkan sebaran pori makro dan meso pada berbagai pengelolaan lahan/konservasi tanah

Figure 5. CT images showing distribution of macro and meso pores as affected by land managements/soil conservation

Tabel 2. Perbandingan hasil penetapan poi makro menggunakan teknik CT Scan dan kurva karakteristik air pada perlakuan konservasi tanah strip rumput

Table 2. Comparison of CT-measured macroporosity and macroporosity estimated from water retention data on land treated with grass strips conservation technique

Zona	Pori makro, CT Scan	Pori makro, kurva karakteristik air	Perbedaan
 m ³ m ⁻³		
Strip rumput	0,084 (0,009)	0,077 (0,004)	0,007 NS
Jagung	0,025 (0,002)	0,030 (0,001)	-0,005 NS
Sedimentasi	0,010 (0,002)	0,013 (0,006)	-0,003 NS

Sumber: Rachman *et al.* (2005)

Keterangan: Angka dalam kurung menunjukkan *Standard Error*, NS = Tidak berbeda nyata

Tabel 3. Hasil penetapan jumlah pori, volume pori makro dan meso, dimensi fraktal dan bentuk pori (*circularity*) menggunakan teknik CT scan

Table 3. *CT-measured macropores, mesopores, number of pores, box-counting fractal dimension, and circularity on land treated with grass strips conservation technique*

Zona	Jumlah pori	Pori makro (>1.000 μm)	Pori meso (200-1.000 μm)	Dimensi fraktal	<i>Circularity</i>	
	 m ³ m ⁻³				
Strip rumput	142,4	0,056	0,006	1,559	0,940	
Jagung	59,6	0,014	0,003	1,305	1,031	
Sedimentasi	28,5	0,006	0,001	1,123	0,965	

Sumber: Rachman *et al.* (2005)

Penelitian Rachman *et al.* (2005) menyimpulkan bahwa hasil pengukuran pori makro menggunakan teknik *CT scan* sangat sesuai dengan hasil yang diperoleh menggunakan metode kurva karakteristik air. Dengan demikian, pengukuran dengan teknik *CT scan* dapat mengkuantifikasi perbedaan porositas tanah sebagai akibat dari perbedaan sistim pengelolaan tanah dan tanaman.

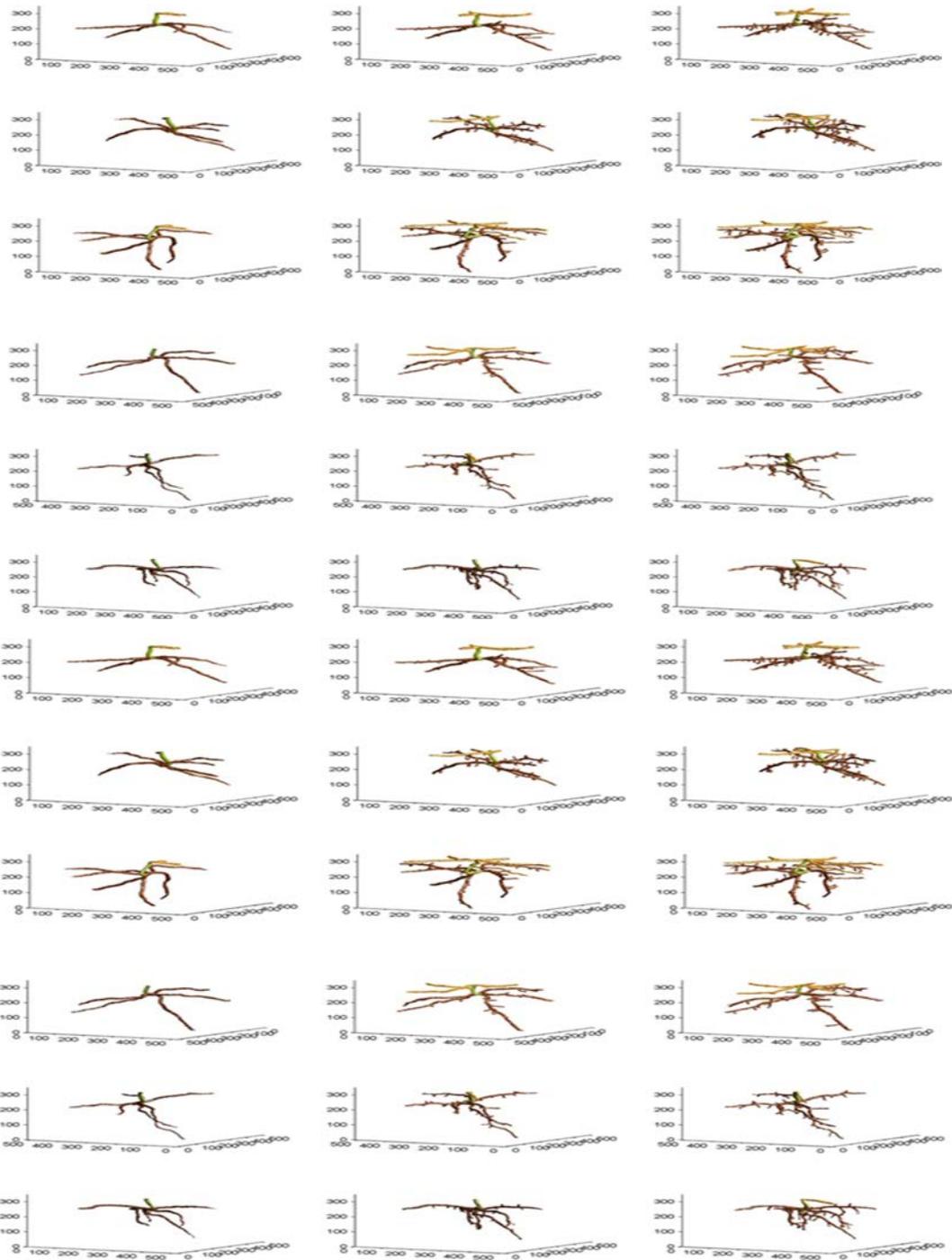
Penelitian Perkembangan Perakaran di Dalam Tanah

Penelitian tentang perkembangan akar di dalam tanah umumnya ditujukan untuk mengetahui bagaimana akar berfungsi dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan kaitannya dengan sifat-sifat tanah yang merupakan media tumbuh. Tantangan utama dalam mencapai tujuan tersebut adalah tingginya variabilitas sifat fisik, kimia dan biologi tanah di lapangan dan respon akar tanaman yang berbeda terhadap kondisi tanah yang beragam (Ho *et al.* 2005). Metode penelitian untuk mempelajari interaksi akar dan media tumbuh dilakukan antara lain dengan metode monolit, pengeboran dan “dinding profil” (*profile wall*). Teknik monolit yaitu dengan mengangkat bongkahan tanah utuh beserta akar yang ada didalamnya yang kemudian dilanjutkan dengan pencucian untuk memisahkan tanah dari akar. Dengan teknik monolit ini dapat dikuantifikasi berat dan volume akar. Teknik pengeboran dilakukan dengan mengebor tanah dimana volume bor sudah diketahui sehingga dapat diperkirakan volume akar dalam tanah. Teknik “dinding profil” dilakukan dengan terlebih dahulu menggali tanah sedalam 1-3 meter, tergantung kedalaman perakaran, di sekitar perakaran tanaman. Dilanjutkan dengan eskavasi pada dinding tanah yang

terbentuk setelah penggalian untuk memisahkan tanah dari akar. Jaringan akar yang menonjol pada dinding tanah kemudian digambar dan difoto untuk dianalisa. Ketiga teknik penelitian akar tersebut selain membutuhkan waktu yang lama juga sangat diperlukan kehati-hatian dan kesabaran yang tinggi agar tidak merusak atau memutus akar.

Kelebihan teknik *CT Scan* dibanding teknik tersebut di atas adalah dapat dihasilkan gambar 3-D setiap saat diinginkan tanpa merusak obyek penelitian (tanah dan akar). Dari gambar 3-D tersebut dapat dianalisa dan dikuantifikasi, menggunakan aplikasi komputer, antara lain bagaimana akar merespon secara morfologi heterogenitas sifat-sifat tanah, laju pertumbuhan panjang akar, dan volume perakaran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Heterogenitas tanah terbentuk sebagai akibat perbedaan cara pengelolaan, bahan pembentuk tanah, kandungan hara, kelembaban, tingkat agregasi tanah, porositas, kepadatan dan lain-lain. Dari data yang diperoleh dapat dibuat model interaksi akar dan tanah untuk berbagai jenis tanaman dan sifat-sifat tanah secara lebih akurat dan mendekati kenyataan.

Subramanian *et al.* (2015) meneliti pengaruh salinitas media tumbuh (100 mM NaCl) terhadap perkecambahan akar jagung. Perkembangan akar diukur 3 kali dengan interval waktu 1 minggu terhadap obyek penelitian yang sama menggunakan teknik *CT scan*. Dalam penelitian ini digunakan Toshiba XVision beresolusi tinggi yang menghasilkan voxel 0,049 mm³ (0,35 mm x 0,35 mm x 0,4 mm). Dari gambar 3-D yang dihasilkan dapat diketahui bahwa kondisi salinitas tinggi pada media perkecambahan menekan perkembangan akar bagian atas (*upper roots*) dan percabangan lateral akar tanaman jagung (Gambar 6).



Sumber: Subramanian *et al.* (2015)

Keterangan: A. Tanah optimal dan B. Tanah salin pada : a. 1 Minggu Setelah Tanam (MST), b. 2 MST, dan c. 3 MST yang diamati pada tiga tanaman

Gambar 6. Gambar 3-D pengaruh salinitas tanah terhadap perkembangan perakaran tanaman jagung.

Figure 6. Three dimensional images of corn root developments as affected by soil salinity.

Dari penelitian ini terlihat kelebihan utama dari teknik *CT scan* dalam penelitian perkembangan akar adalah dimungkinkannya merekam perkembangan dan perubahan yang terjadi pada setiap individu akar.

Namun demikian, penggunaan *CT scan* dalam penelitian akar perlu kehati-hatian dalam menentukan intensitas radiasi yang dipancarkan agar tidak mengganggu tanaman, dilain pihak cukup kuat untuk bisa menembus tanah yang mengelilingi perakaran dengan atenuasi yang tidak terlalu besar. Radiasi yang terlalu rendah akan menyebabkan atenuasi yang besar sehingga gambar yang dihasilkan, khususnya pada bagian tengah contoh, menjadi kurang akurat. Di lain pihak, dengan radiasi yang tinggi akan dihasilkan gambar yang lebih akurat namun di khawatirkan akan mempengaruhi pertumbuhan akar setelah proses radiasi.

Subramanian *et al.* (2015) menggunakan energi radiasi sebesar 120 kV dan 150 mA pada penelitiannya, peneliti lainnya seperti Bastardie *et al.* (2005) yang menggunakan *Medical CT Scanner* dengan radiasi 130 kV dan 120 mA dan Langmaack *et al.* (2002) dengan radiasi 80 kV dan 135mA.

IMPLIKASI PEMANFAATAN TEKNIK CT SCAN DALAM PENELITIAN TANAH

Keunggulan utama dari penggunaan teknik *CT scan* dalam penelitian tanah dibanding teknik lainnya adalah 1) dimungkinkannya melakukan pengamatan yang berulang pada obyek yang sama tanpa merusak obyek penelitian, 2) mendapatkan hasil pengamatan lebih cepat melalui analisis gambar 3 Dimensi (3-D) yang dihasilkan, dan 3) hasil pengamatan yang detil karena resolusi gambar yang cukup besar (<1 mm). Dengan kelebihan tersebut, berbagai proses yang terjadi dalam tanah seperti perubahan karakteristik porositas tanah, kelembaban tanah, kepadatan tanah, perkembangan biota tanah dan perkembangan akar dapat diamati pada level struktur mikro dan dari waktu ke waktu pada contoh yang sama. Parameter jumlah pori tanah yang berkorelasi tinggi dengan hantaran hidraulik tanah dapat dikuantifikasi dengan menggunakan teknik CT-scan, sehingga dapat memprediksi laju infiltrasi dan volume aliran permukaan secara lebih tepat.

Analisis terhadap gambar 3-D yang dihasilkan dapat diketahui respon akar terhadap berbagai bentuk

cekaman (*stress*), baik yang bersifat abiotik maupun biotik. Informasi tersebut tidak dapat diperoleh dengan menggunakan teknik sebelumnya karena pengamatan berikutnya dilakukan pada contoh yang berbeda dari contoh yang sudah diamati sebelumnya. Dengan menggunakan contoh yang berbeda pada setiap kali melakukan pengamatan tidak akan dapat menjelaskan urutan proses yang sebenarnya terjadi.

Pemahaman terhadap berbagai proses yang terjadi dalam tanah sebagai akibat dari faktor eksternal dan internal tersebut akan memperbaiki respon pelaksana di lapangan dalam menyikapi berbagai cekaman yang terjadi. Demikian pula terhadap penyusunan rekomendasi teknik budidaya berbagai komoditas akan lebih tajam dan akurat karena sangat spesifik lokasi.

PENUTUP

Penggunaan teknologi *CT Scanner* dalam penelitian tanah sangat potensial dalam memberikan pemahaman yang lebih detil tentang proses-proses yang terjadi dalam tanah. Kelebihan utama dari teknik ini adalah dihasilkannya gambar 3-D tanpa menyebabkan gangguan terhadap obyek penelitian. Dari gambar 3-D tersebut dapat dianalisa berbagai parameter tanah termasuk juga penelitian perkembangan perakaran tanaman dan interaksi keduanya.

Secara umum penelitian dengan menggunakan teknik ini masih didominasi penelitian untuk mengkarakterisasi sifat-sifat fisik tanah, khususnya yang berkaitan dengan porositas dan kepadatan. Hal ini terutama disebabkan oleh perbedaan kepadatan yang besar antara partikel tanah dengan ruang pori yang berisi udara atau air yang menghasilkan koefisien linier atenuasi yang juga sangat berbeda. Tingkat kedetilan pengukuran/pengamatan sangat ditentukan oleh besar kecilnya resolusi gambar yang dihasilkan dari peralatan *CT Scan* yang digunakan. Makin besar resolusi gambar 3-D yang dihasilkan makin besar tingkat kedetilan pengamatan yang dihasilkan.

Penelitian yang terkait dengan agregasi tanah, dekomposisi bahan organik dalam tanah, aktivitas biologi tanah dan keterkaitan ketiganya dengan menggunakan teknik ini belum banyak dilakukan. Pemahaman terhadap ketiga parameter tanah tersebut sangat penting untuk menghasilkan rekomendasi

pengelolaan yang tepat sehingga dapat dijaga kualitas tanah tetap baik, khususnya di daerah tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Allaire-Leung, S.E., S.C. Gupta, and J.F. Moncrief. 2000. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: I. Macropore continuity. *J. Sontam. Hydrol.* 41:283-301.
- Anderson, S.H., C.J. Gantzer, J.M. Boone, and R.J. Tully. 1988. Rapid Nondestructive Bulk Density and Soil-Water Content Determination by Computed Tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:35-40.
- Anderson, S.H., R.L. Peyton, and C.J. Gantzer. 1990. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma.* 46:13-29.
- Assmus, A. 1995. Early History of X Rays. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/25/2/25-2-assmus.pdf>
- Beven, K., and P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* 18:1311-1325.
- Bastardie, F., Y. Capowiez, and D. Vluseau. 2005. 3D characterization of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture. *Appl. Soil Ecol.* 30:34-46.
- Denison, C., Carlson, W. D. and Ketcham, R. A. 1997. Three dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Part I. Methods and techniques. *J. Metamorphic Geol.* 15: 29-44
- Edwards, W. M., L. D. Norton., and C. E. Redmont. 1988. Characterizing macropores that affect infiltration into non-tilled soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:483-487.
- Edwards, W. M., M. J. Shipitalo, and L. D. Norton. 1988. Contribution of macroporosity to infiltration into a continuous corn no-tilled watershed: Implications for contaminant movement. *J. Contam. Hydrol.* 3:193-205.
- Everts, C. J., and R. S. Kanwar. 1993. Interpreting tension-infiltration data for quantifying soil macropores: Some particle consideration. *Trans. ASAE* 36:423-428.
- Gantzer, C. J., and S. H. Anderson. 2002. Computed topographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. *Soil Tillage Res.* 64:101-111.
- Heard, J. R., E. J. Klavivko, and J. V. Mannering. 1988. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. *Soil Tillage Res.* 11:1-18
- Ho, M. D, J. C. Rosas, K. M. Brown, and J. P. Lynch. 2005. Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional Plant Biology* 32: 737-748.
- Hounsfield, G. N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. *Br. J. Radiol.* 46: 1016-1022.
- Jury, W. A., W. R. Gardner, and W. H. Gardner. 1991. *Soil Physics.* John Wiley & Sons, New York.
- Lamandé, M., Wildenschild, D., Berisso, F. E. Garbout, A. Marsh, M. Møldrup, P. Keller, T. Hansen, S.B. de Jonge, L.W. Schjønning. 2013. X-ray CT and laboratory measurements on glacial till subsoil cores – assessment of inherent and compaction-affected soil structure characteristics. *Soil Science*, 178(7), 359-368.
- Langmaack, M., S. Schrader, U. Rapp-Bernardt and K. Kotzke. 2002. Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma* 105: 141-152.
- Mermut, A.R., M.C.J. Grevers, and E. de Jong. 1992. Evaluation of pores under different management systems by image analysis of clay soils in Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 53:357-372
- Perret, J., S. O. Prasher, A. Kantzas, and C. Langford. 1999. Three-Dimensional Quantification of Macropore Networks in Undisturbed Soil Cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1530-1543.
- Petrovic, A. M., J. E. Siebert and P. E. Rieke. 1982. Soil bulk density analysis in three-dimensions by computed tomography scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:445-450.
- Phillips, D. H. and J. J. Lannutti. 1997. Measuring physical density with x-ray computed tomography. *NDT & E International* 30:339-350.
- Pires, L. F., F. A. M. Cássaro, O. O. S. Bacchi, and K. Reichardt. 2011. Non-destructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics. *Radiation Physics and Chemistry* 80:561-566.
- Rachman, A., S. H. Anderson, C. J. Gantzer, and E. E. Alberts. 2004. Soil Hydraulic Conductivity by Stiff-Stemmed Grass Hedge Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1386-1393
- Rachman, A., S. H. Anderson, and C. J. Gantzer. 2005. Computed-Tomography Measurement of Soil Macroporosity Parameters as Affected by Stiff-Stemmed Grass Hedges. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1609-1616.
- Rasband, W. 2002. NIH ImageJ Research Service Branch, National Institute of Mental Health, National Institute of Health. Bethesda, MD, USA.
- Rasiah, V. and L. A. G. Aylmore. 1998. Estimating Microscale Spatial Distribution of Conductivity and Pore Continuity Using Computed Tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1197-1202.
- Subramanian, S., Liwen Han, P. Dutilleul, and D. L. Smith. 2015. Computer tomography scanning can monitor the effects of soil medium on root system development: An example of salt stress in corn. *Front. Plant Sci.* 6.

- Taina, I. A., R.J. Heck, and T.R. Elliot. 2007. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Can. J. Soil Sci.* 88:1-20.
- Udawatta, R. P., S. H. Anderson, C. J. Gantzer, and H. E. Garrett. 2008. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics. *J. Environ. Qual.* 37:219-228.
- Warner, G. S., J. L. Nieber, I. D. Moore, and R. A. Geise. 1989. Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:653-660.